

SÉRIE A.
N° 863.
N° D'ORDRE
1664.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. C.-E. BRAZIER.

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES MOULINETS
ANÉOMÉTRIQUES.

2^{re} THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 18 janvier 1921 devant la Commission d'Examen.

MM. MARCHIS, *Président.*
M. GUICHARD, *Examinateurs.*
ANGOT;

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Quai des Grands-Augustins, 55

1921

SÉRIE A.
N° 863.
N° D'ORDRE
1664.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. C.-E. BRAZIER.

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES MOULINETS
ANÉMOMÉTRIQUES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le janvier 1921 devant la Commission d'Examen.



MM. MARCHIS, *Président.*
M. GUICHARD, } *Examineurs.*
ANGOT, }

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Quai des Grands-Augustins, 55

1921

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

MM.

Doyen	F. HOUSSAY, profess..	Zoologie.
Doyen honoraire	P. APPELL, professeur.	Mécanique analytique et Mécanique céleste
Professeurs honoraires ...	P. PUISEUX, VELAIN, BOUSSINESQ.	
	LIPPMANN.....	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	E. PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
	Y. DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie compar.
	GASTON BONNIER...	Botanique.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	JANET.....	Physique.
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie.
	PAINLEVÉ.....	Mécanique analytique et Mécanique céleste.
	HAUG.....	Géologie.
	H. LE CHATELIER..	Chimie.
	GABRIEL BERTRAND..	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale.
Professeurs	CAULLERY.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN.....	Chimie.
	EMILE BOREL.....	Physique mathématique et Calcul des probabilités.
	MARCHIS.....	Aviation.
	JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
	G. PRUVOT.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie comparée.
	MATRUCHOT.....	Botanique.
	ABRAHAM.....	Physique.
	CARTAN.....	Mécanique rationnelle.
	CL. GUICHARD.....	Géométrie supérieure.
	MOLLIARD.....	Physiologie végétale.
	LEBESGUE.....	Application de l'Analyse à la Géométrie.
	LAPICQUE.....	Physiologie générale.
	GENTIL.....	Géographie physique.
	VESSIOT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	COTTON.....	Physique théorique et Physique céleste.
	N.....	Histologie.
	N.....	Mathématiques générales.
	LEDUC.....	Physique.
	HÉROUARD.....	Zoologie.
	LÉON BERTRAND.....	Géologie.
	RÉMY PERRIER.....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
Professeurs adjoints	LESPIEAU.....	Chimie.
	SAGNAC.....	Physique (Enseignement P. C. N.).
	PEREZ.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
	RABAUD.....	Biologie générale.
	PORTIER.....	Physiologie.
	BLAISE.....	Chimie organique.
	PÉCHARD.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
Secrétaire	D. TOMBECK.	

A

MONSIEUR ALFRED ANGOT

DIRECTEUR DU BUREAU CENTRAL MÉTÉOROLOGIQUE

Respectueux hommage



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556008_0020

PREMIÈRE THÈSE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES

PRÉFACE.

Lorsque j'ai entrepris les recherches exposées dans ce Mémoire, je ne pensais pas qu'elles prendraient l'extension que j'ai été conduit à leur donner par la suite. Mon but primitif était de déterminer le degré de précision des mesures anémométriques faites avec les instruments actuellement en usage et d'étudier uniquement à ce point de vue l'anémomètre à moulinet Robinson et l'anémomètre à moulinet Richard employés dans les stations françaises.

Cette donnée m'était en effet nécessaire pour discuter les observations que j'avais utilisées en vue de rechercher le sens et la grandeur des modifications introduites dans les relations du vent avec le gradient, dans les couches d'air voisines du sol, par les variations de la distribution des éléments météorologiques aux alentours du point où les mesures sont effectuées ⁽¹⁾.

Les phénomènes que j'ai constatés en étudiant l'influence de l'inclinaison des filets d'un courant d'air sur la vitesse de rotation des anémomètres Robinson et Richard, l'intérêt qui s'attache pour le météorologiste à la connaissance la plus complète possible du fonctionnement des appareils employés pour enregistrer la vitesse du vent, et la nécessité de déterminer le degré de précision des nombres qu'ils fournissent avant de tenter d'en faire une discussion vraiment objective, m'ont amené à laisser provisoirement de côté le travail que j'avais commencé pour étudier d'abord le fonctionnement des moulinets anémométriques.

M. Angot, directeur du Bureau Central météorologique, m'a vivement conseillé de poursuivre ces recherches et je tiens à lui exprimer ma sincère gra-

⁽¹⁾ *C. R. Acad. Sc.*, t. 168, p. 116c; t. 169, p. 730 et 869.

titude pour les encouragements qu'il m'a prodigués et pour sa bienveillante intervention auprès de MM. Eiffel et Toussaint, grâce à laquelle les portes des laboratoires d'Auteuil et de Saint-Cyr m'ont été si largement ouvertes.

Les premières mesures ont été faites au Laboratoire aérodynamique G. Eiffel dont les ressources, mises gracieusement à ma disposition, m'ont permis d'orienter mon travail. Je suis heureux de pouvoir exprimer tous mes remerciements à M. Eiffel pour l'obligeance avec laquelle il m'a laissé user de ses souffleries et à ses collaborateurs, MM. A. Lapresle, directeur du laboratoire, et M. Richard, ingénieur, pour la complaisance qu'ils m'ont manifestée en m'initiant à leurs méthodes et en se prêtant à la réalisation de mes expériences.

Une grande partie du travail a été faite à Saint-Cyr, à l'Institut aérotechnique de l'Université de Paris dirigé par M. Toussaint. Grâce aux facilités qu'il m'a accordées, et dont je lui sais le plus grand gré, j'ai pu éliminer un certain nombre de causes d'erreurs en m'entourant des précautions que m'ont suggérées une pratique déjà longue de la vérification des instruments météorologiques et l'éducation expérimentale que j'ai reçue au Laboratoire d'enseignement de la Physique de la Sorbonne dirigé par mon ancien Maître, M. le professeur Bouty, que je prie d'agréer l'expression de ma respectueuse sympathie.

C'est là que M. Dongier, alors sous-directeur de ce laboratoire, m'a initié à la pratique des mesures physiques. Devenu depuis mon chef de Service au Bureau Central météorologique, il m'a continué ses excellents conseils en m'associant à ses travaux et, depuis ma démobilisation, avec un désintéressement dont je ne puis assez le remercier, a assumé la totalité de la besogne administrative et m'a déchargé d'une grande partie du travail matériel qui m'incombait pour me permettre de me consacrer à mes expériences et à leur discussion.

M. J. Richard, le constructeur bien connu, toujours prêt à venir en aide aux chercheurs qui poursuivent l'étude et le perfectionnement des appareils météorologiques, a bien voulu me prêter un certain nombre d'instruments et faire réaliser dans ses ateliers la plupart des moulinets qui ont été expérimentés. Je serais heureux que les résultats obtenus puissent lui être de quelque utilité.

Les recherches bibliographiques ont été notablement abrégées par l'amabilité avec laquelle M. Goutereau, chef du Service des Avertissements, a mis à ma disposition les renseignements qu'il avait autrefois rassemblés sur la question de l'anémométrie.

Les divers dispositifs expérimentaux qui m'ont été nécessaires ont pu être construits à l'atelier du Bureau Central météorologique et l'habileté du mécanicien, M. Parre, m'a été d'un précieux secours pour mener à bien leur réalisation.

Mes remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à faciliter mes recherches et je les prie de recevoir l'expression de mon reconnaissant souvenir.

INTRODUCTION.

Considérations générales sur le vent et sa mesure.

Nature du vent. — L'anémométrie comprend l'étude des procédés et des appareils à l'aide desquels on effectue la mesure de la vitesse du vent et des moyens permettant de se rendre compte de la précision des nombres obtenus.

Pour se faire une idée de la complexité des problèmes que l'on doit résoudre en anémométrie, il est important de ne pas oublier que le mouvement de l'air qui constitue le vent est loin d'être comparable à celui d'une nappe liquide de vaste étendue s'écoulant d'une manière uniforme.

Quiconque a suivi de l'œil la trajectoire décrite par un objet léger emporté par le vent a pu remarquer que les courants aériens, tout au moins dans les couches d'air voisines du sol, ne sont pas formés de filets animés d'un mouvement rectiligne et uniforme. En ce qui concerne les couches plus élevées, les formes affectées par les nuages et les déformations rapides que subissent leurs contours montrent que, même à des hauteurs assez grandes, l'air ne s'écoule pas d'un mouvement régulier et en filets parallèles. L'expérience journalière nous a d'ailleurs appris à tous que le vent souffle par bouffées ou rafales séparées par des accalmies plus ou moins prononcées et que l'intensité de ces rafales est fort variable d'un point à un autre.

La variabilité de la vitesse du vent dans le temps et dans l'espace est telle que certains auteurs ont été conduits à penser que le vent consisterait « *surtout dans des mouvements de masses détachées* » que l'on peut comparer, « *pour fixer les idées, à des projectiles d'air, traversant la masse générale de l'atmosphère* » ⁽¹⁾. Les études sur la variabilité du vent publiées par Lancaster ⁽²⁾, Fines ⁽³⁾, Houdaille ⁽⁴⁾, Langley ⁽⁵⁾, Simpson ⁽⁶⁾, Dines ⁽⁷⁾, Maurain ⁽⁸⁾, C.-E. Brazier et M. Gignoux ⁽⁹⁾ ont bien fait ressortir que, dans le cas général et jusqu'à 300^m au-dessus du sol, la vitesse du vent subit des fluctuations très rapides en grandeur et en direction

(1) HOUZEAU, cité par LANCASTER, *Sur la nature du vent* (Congrès de la science de l'atmosphère, Anvers, août 1894).

(2) LANCASTER, *Sur la nature du vent*, loc. cit.

(3) *Bulletin de la Commission météorologique des Pyrénées-Orientales*, 1889.

(4) *Bulletin de la Commission météorologique de l'Hérault*, 1897.

(5) *The internal work of wind*, Smithsonian Contributions, Washington, 1893, et *American Journal of Science*, 1894.

(6) *Meteorological Office*, n° 180.

(7) *Advisory Committee for Aeronautics (Reports and Memoranda*, années 1909 à 1914).

(8) *Bulletin de l'Institut aérotechnique de l'Université de Paris*, III, 1913.

(9) *Annuaire de la Société météorologique de France*, LXIII, 1915-1919.

4 RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

et que le mouvement de l'air auquel nous donnons le nom de *vent* présente tous les caractères d'un mouvement turbulent.

Il faut cependant reconnaître qu'à une hauteur suffisante dans l'atmosphère libre, ce mouvement peut dans certains cas être considéré comme sensiblement uniforme pendant un laps de temps assez considérable. Le 18 novembre 1916 par exemple, j'ai enregistré à la Tour Eiffel entre 7^h 15^m et 7^h 45^m un vent très régulier dont les vitesses extrêmes sont restées comprises entre 8 et 9 m : sec. et depuis cette époque j'ai pu constater plusieurs fois le même phénomène. On peut dire cependant que, à 300^m au-dessus de Paris, il constitue une exception, et si l'on adopte l'opinion de Langley ⁽¹⁾, corroborée d'ailleurs par l'observation des nuages, il en est de même à des altitudes beaucoup plus élevées.

Mesure de la vitesse du vent. — La mesure de la vitesse du vent dans tous ses détails nous apparaît donc comme extrêmement difficile à réaliser : aussi se borne-t-on la plupart du temps à tâcher de déterminer, en un point donné et pendant un intervalle de temps déterminé, le mouvement moyen de l'air en admettant que ce mouvement est rectiligne et uniforme. Nous étudierons ci-dessous quelles sont les conditions auxquelles doivent satisfaire les instruments de mesure ou anémomètres pour que leurs indications permettent de connaître la vitesse moyenne du vent.

La vitesse du vent est une grandeur vectorielle et peut se définir de deux manières :

- 1^o Par ses composantes suivant trois axes de coordonnées;
- 2^o Par sa grandeur et sa direction.

Ces deux procédés qui, au point de vue théorique, ont la même valeur, sont inégalement difficiles à mettre en application. En fait, on n'a pas jusqu'à présent réalisé, à ma connaissance, d'appareil pratique permettant d'enregistrer simultanément les composantes de la vitesse du vent et l'on s'est borné à établir des instruments en vue d'obtenir séparément la vitesse et la direction des courants aériens.

Quelquefois le même transmetteur permet d'enregistrer sur des récepteurs séparés la direction d'une part et la vitesse d'autre part; le plus souvent on détermine la direction à l'aide d'un transmetteur spécial nommé *anémoscope* ou *girouette*. Les girouettes sont connues et employées depuis un temps immémorial, mais on n'a guère commencé à les observer systématiquement que vers 1650, en Italie, et 1667, en Angleterre ⁽²⁾. Leur emploi ne résout d'ailleurs

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ Cf. ABBE, *Treatise on Meteorological Apparatus and Methods* (Washington, 1888).

que partiellement le problème de la détermination de la direction du vent. En effet, si elles permettent de définir le plan vertical dans lequel se trouve la direction du courant, elles ne donnent pas son inclinaison sur l'horizon. Quoique des appareils aient été inventés dans le but de donner la direction dans l'espace ⁽¹⁾, il ne semble pas qu'ils soient devenus jusqu'à présent d'un usage courant. On peut faire la même remarque concernant les instruments imaginés pour la mesure de la vitesse. La plupart des anémomètres sont en effet construits pour donner le chemin parcouru par le vent dans un plan horizontal et les diverses tentatives faites, soit pour construire des appareils fournissant les composantes du vent suivant trois axes rectangulaires, soit pour mesurer la composante verticale, paraissent n'avoir eu que peu de succès.

En fait, ce que l'on entend actuellement par vitesse du vent c'est le chemin moyen parcouru horizontalement par le vent pendant l'unité de temps, sa direction étant le point de l'horizon dont paraissent provenir les filets d'air constituant le courant aérien. Ce sont ces deux éléments que l'on se propose généralement de déterminer. Il est inutile d'insister sur l'importance de ces mesures tant au point de vue des recherches de météorologie pure qu'au point de vue des applications pratiques. Le navigateur et le géographe, l'ingénieur et l'architecte, le climatologiste et l'agriculteur sont les premiers à en faire leur profit.

Pendant bien longtemps on s'est contenté de mesurer la vitesse du vent dans les couches basses. Mais le développement très rapide de la navigation aérienne et l'introduction dans la balistique des corrections dues à l'action du vent sur les projectiles ont forcé l'anémométrie à étendre son domaine. A l'heure actuelle la connaissance de la vitesse et de la direction des courants dans les couches élevées, qui n'intéressait guère autrefois que les météorologistes, est devenue d'une importance fondamentale au point de vue pratique.

L'étude des procédés employés pour déterminer la vitesse des vents supérieurs, que l'on déduit soit du mouvement des nuages, soit de la trajectoire suivie par des ballons de caoutchouc gonflés d'hydrogène, sortirait du cadre de ce travail. Nous ne considérons donc dans ce qui va suivre que ceux dont on se sert pour mesurer le vent au voisinage du sol.

Principe des anémomètres. — L'air en mouvement est capable de produire un certain nombre d'effets mécaniques ou physiques dont la grandeur est en relation avec la vitesse des filets d'air. Un certain nombre de ces effets, susceptibles d'être mesurés d'une manière relativement commode, peuvent être employés

⁽¹⁾ LAUGHTON, *Historical Sketch of Anemometry and Anemometers* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., VIII, 1882, p. 174). — P. MARC DECHEVRENS, *Sur l'inclinaison des vents* (Zi-Ka-Wei, 1881). — CASELLA, *Description of an Altazimuth anemometer for continuously recording the vertical angle as well as the horizontal direction and force of the wind* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. XII, 1886). — Etc.

6 RECHERCHES EXPERIMENTALES SUR LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

pour comparer l'intensité des mouvements de l'air auxquels ils sont dus. Par exemple, le vent exerce sur les corps qui lui sont exposés une pression qui croît rapidement avec sa vitesse, il est susceptible de faire tourner des mécanismes appropriés et convenablement orientés, il accélère la perte de chaleur des corps maintenus à une température supérieure à celle de l'air, active l'évaporation, etc. On a basé sur toutes ces actions des procédés anémométriques, mais les seuls effets qui aient permis de construire jusqu'à présent des appareils vraiment pratiques se ramènent à :

- 1^o La pression;
- 2^o La rotation;
- 3^o Le refroidissement.

D'où trois grandes classes d'appareils anémométriques qui, rangés suivant l'ordre d'ancienneté, sont : les anémomètres à pression, les anémomètres à rotation et les anémomètres à refroidissement. Étant donnée l'extrême variété des instruments appartenant à ces diverses catégories, j'ai cru bon d'étudier tout d'abord ceux qui sont actuellement les plus répandus. C'est pourquoi les recherches exposées dans ce travail concernent uniquement les anémomètres à rotation.

Étalonnage des anémomètres. — Pour être en mesure de déduire la vitesse du vent des indications d'un anémomètre à pression, à rotation ou à refroidissement, il est indispensable d'étalonner l'appareil. Pour y parvenir, on peut avoir recours à deux procédés :

- 1^o Placer l'anémomètre dans des courants d'air de vitesse connue et construire la courbe de ses indications en fonction des vitesses.
- 2^o Déplacer l'instrument dans l'air calme et déterminer la loi suivant laquelle varient ses indications en fonction de la vitesse du déplacement.

Le premier de ces procédés exige la réalisation de courants d'air de vitesse connue et variable à volonté, pouvant être maintenus uniformes pendant un temps assez long, et possédant une section suffisamment grande pour que les filets extrêmes ne soient pas déviés par les appareils qu'on y introduit. C'est là un problème qui n'a été pratiquement résolu que dans ces vingt dernières années; aussi s'est-on contenté jusqu'à présent de mettre en usage le procédé inverse en déplaçant dans l'air avec une vitesse déterminée l'instrument à étalonner.

Le plus souvent, celui-ci est fixé à l'extrémité du bras d'un manège dont la vitesse de rotation peut être maintenue constante à telle valeur que l'on désire. La vitesse du bras par rapport à l'air ambiant est nulle au centre du manège et croît à mesure que l'on s'écarte de ce point; pour que l'anémomètre puisse être considéré comme placé dans un courant d'air uniforme, il faudrait donc le fixer sur le bras d'autant plus loin du centre que les

dimensions de l'organe sur lequel s'exerce l'action du vent sont elles-mêmes plus grandes. En réalité, on le place à des distances différentes de l'axe et l'on détermine par le calcul la vitesse de rotation que prendrait le moulinet si on le déplaçait suivant une trajectoire rectiligne.

Ce n'est d'ailleurs pas la seule correction que nécessitent les expériences faites par ce procédé. On ne peut négliger, si l'on veut obtenir des résultats précis, les mouvements parasites de l'air dus au vent naturel, si l'on opère à l'air libre, et à l'entraînement par le bras du manège. On s'assure par des anémomètres établis à poste fixe dans des endroits convenables, par des ballonnets équilibrés, par des fumées, etc., de l'importance relative de ces mouvements parasites et l'on mesure leur ordre de grandeur afin d'en tenir compte dans la détermination du mouvement relatif de l'instrument par rapport à l'air entraîné. Il est bon de remarquer que le mouvement de ce dernier n'est pas normal au bras du manège mais qu'il est dirigé obliquement par rapport à celui-ci par suite de l'action de la force centrifuge.

Le sens de rotation du manège pourra dans certains cas ne pas être indifférent. Avec les anémomètres à coupes, par exemple, si le sens de la rotation est tel que la coupe offrant sa concavité au vent est la plus éloignée de l'axe, le moulinet tournera plus rapidement pour une vitesse angulaire donnée que dans le cas contraire. On est alors obligé, soit de faire tourner alternativement le manège dans les deux sens et de prendre la moyenne des mesures, soit de disposer l'anémomètre de telle manière que son axe, au lieu d'être placé perpendiculairement au bras, se trouve dans son prolongement.

Cette seconde manière de faire a été fort critiquée. La force centrifuge développée par la rotation du bras tend à éloigner le moulinet de l'axe du manège. Il est donc indispensable de placer l'anémomètre de manière que la crapaudine soit tournée vers l'extérieur et le moulinet vers le centre, sinon les conditions du fonctionnement sont tout à fait changées. Même dans ce cas on ne peut affirmer que les conditions dans lesquelles se trouve placé l'instrument sont comparables à celles dans lesquelles il est destiné à fonctionner. La pression de l'extrémité de l'axe sur sa crapaudine est en effet considérablement augmentée surtout pour les grandes vitesses et les courts rayons de giration et doit causer des variations de frottement assez notables. Il faut d'ailleurs reconnaître que si l'on opère avec l'axe du moulinet disposé verticalement et perpendiculairement au bras, la force centrifuge intervient également pour accroître le frottement de l'axe sur ses coussinets et que là encore les conditions de fonctionnement ne sont pas exactement comparables à celles dans lesquelles l'instrument se trouve ordinairement placé pour la mesure de la vitesse du vent.

Toutes les corrections que nécessite la méthode du manège rendent bien préférable le procédé d'étalonnage qui consiste à placer l'anémomètre à poste

8 RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

fixe, dans des courants d'air de vitesse connue, puisque c'est en opérant de cette manière que l'on s'écarte le moins possible des conditions dans lesquelles l'instrument est appelé à fonctionner plus tard. C'est une des raisons pour lesquelles il m'a paru utile de profiter des ressources que nous offrent les laboratoires aérodynamiques pour reprendre l'étude des anémomètres.

Comparaisons à l'air libre. — Supposons que l'étalonnage d'un anémomètre ait pu être fait avec toute l'exactitude désirable et que l'on connaisse la relation $V = f(n)$ qui existe entre le nombre de tours qu'il effectue par unité de temps, n , et la vitesse du courant d'air, V , dans lequel il se trouve placé. Le tarage étant fait par paliers successifs, la courbe $V = f(n)$ représente la manière dont se comporte l'appareil quand l'état permanent est atteint. A l'air libre les conditions ne sont plus les mêmes : il est rare que l'on puisse considérer l'état permanent comme étant réalisé; la vitesse du vent est une certaine fonction du temps et l'on n'est plus toujours en droit de négliger le moment d'inertie de la partie tournante, pas plus que l'influence des changements de direction des filets d'air qui agissent sur elle, si l'axe est assujéti, comme c'est le cas général, à rester toujours dans le même plan. Le problème devient extrêmement complexe et l'on se trouve obligé pour le simplifier d'admettre un certain nombre d'hypothèses. Admettons donc que le moment d'inertie du moulinet soit assez faible pour pouvoir être négligé et que sa vitesse de rotation soit uniquement due à la composante horizontale de la vitesse du vent, et cherchons à quelles conditions devra satisfaire l'anémomètre pour que l'on puisse déduire de ses indications la vitesse moyenne du vent pendant un intervalle donné.

Deux cas peuvent se présenter :

1° La fonction $V = f(n)$ est de la forme $V = a + bn$ dans laquelle a et b sont des constantes;

2° La relation entre V et n ne peut être représentée par une formule linéaire.

Dans le premier cas, la vitesse moyenne du vent s'obtiendra en introduisant dans la formule $V = a + bn$ la valeur moyenne de n pendant l'intervalle de temps donné.

En effet, si V_m est la vitesse moyenne, V la vitesse actuelle, T l'intervalle pendant lequel on désire connaître la vitesse moyenne on a

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T V dt;$$

d'autre part,

$$V = a + bn = a + b\psi(t),$$

d'où

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T [a + b\psi(t)] dt = a + bn_m,$$

Il suffira donc d'enregistrer le nombre de tours effectués par le moulinet dans l'intervalle pendant lequel on veut déterminer la vitesse du vent et d'en déduire le nombre moyen de tours par unité de temps pour être en mesure de calculer V_m .

Il n'en est plus de même si $V = f(n)$ n'est pas une fonction linéaire.

Supposons pour fixer les idées que l'on ait $V = a + bn + cn^2$:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T [a + b\psi(t) + c[\psi(t)]^2] dt = a + bn_m + \int_0^T [\psi(t)]^2 dt.$$

Cette dernière intégrale ne peut se calculer que si l'on connaît $\psi(t)$. Il en résulte que la vitesse moyenne dans un intervalle donné ne peut plus être obtenue que si l'on enregistre les variations de la vitesse de rotation du moulinet pendant le laps de temps considéré.

On conçoit donc que, en comparant dans le vent naturel les indications d'anémomètres à rotation pour lesquels la relation $V = f(n)$ n'est pas linéaire et affecte des formes différentes, on n'obtiendra que des résultats peu concordants si ces instruments sont munis, comme c'est le cas la plupart du temps, de compteurs totalisant le nombre de tours.

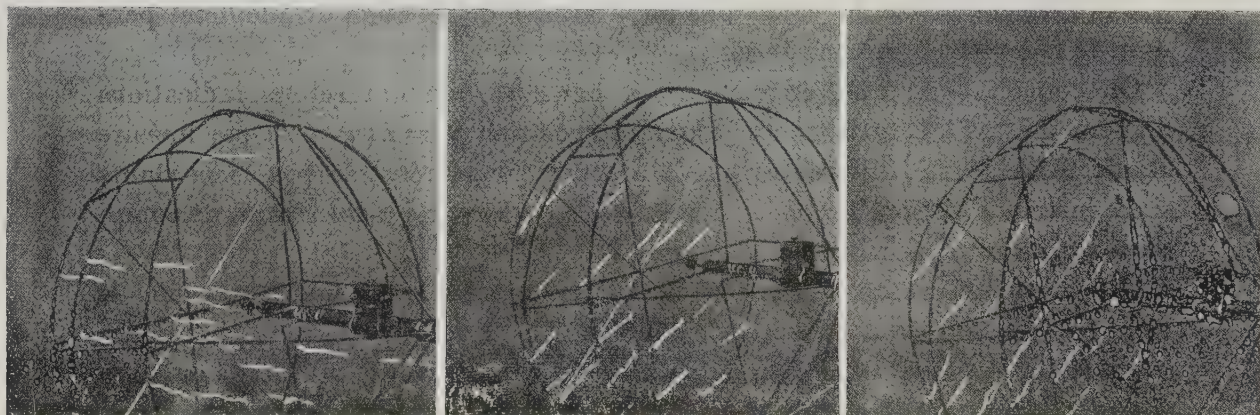
D'ailleurs, une comparaison précise des indications des anémomètres dans le vent naturel exigerait encore la réalisation d'autres conditions. Les organes sensibles de ces instruments étant en général assujettis soit à tourner dans un plan déterminé, soit à se présenter au vent sous une inclinaison fixe, il faudrait, ou bien que l'inclinaison du vent sur l'horizon restât très faible et ne subît pas de notables fluctuations, ou bien que les indications des divers anémomètres mis en étude fussent proportionnelles à la même fraction de la composante horizontale du déplacement de l'air.

Dans le cas général, la première de ces conditions ne peut être considérée comme étant réalisée, même si l'on se place à des hauteurs assez grandes au-dessus du sol. L'inclinaison du vent reste en effet sujette à varier rapidement d'un instant à l'autre et peut atteindre des valeurs beaucoup plus grandes qu'on ne serait tenté de le croire *a priori*. On trouvera dans les photographies ci-après que j'ai prises au sommet de la Tour Eiffel le 3 juin 1920 un exemple très net de la variabilité de l'inclinaison du vent. Ces documents font voir qu'à 300^m au-dessus du sol, le vent, dont la direction est indiquée par l'orientation que prennent de courts fils de laine portés par une carcasse métallique, peut présenter en l'espace de quelques minutes toutes les inclinaisons comprises entre 0° et 60°.

Puisque le vent souffle la plupart du temps par rafales plus ou moins inclinées sur l'horizon, il faudrait, pour que les comparaisons fussent valables, que la seconde condition fût remplie, c'est-à-dire que les divers anémomètres se comportassent de la même manière dans un courant d'air incliné. Or, dans l'état

actuel de nos connaissances, il est impossible de rien affirmer à ce sujet. On sait bien que si les filets d'air font avec l'horizon un angle dont la valeur ne dépasse pas notablement 10^0 , les données qu'ils fournissent sont à peu de chose près les mêmes que lorsque le vent souffle horizontalement. Mais on ne connaît pas exactement la manière dont ces instruments se comportent lorsque l'inclinaison prend des valeurs très grandes. Les recherches effectuées au manège par Hasenkamp ⁽¹⁾ ne fournissent sur cette question que des indications assez vagues vu la difficulté d'interpréter les résultats de ses expériences.

Fig. 1.

16^h 3^m16^h 7^m16^h 9^m

Photographies prises au sommet de la Tour Eiffel le 3 juin 1920.

Exemple de variations rapides de l'inclinaison du vent.

Il apparaît donc que les comparaisons d'anémomètres dans le vent naturel sont loin d'avoir la portée pratique que certains auteurs leur ont attribuée. Faites dans des conditions mal définies, elles ne peuvent conduire qu'à des résultats incertains. Pour qu'elles eussent une signification précise et qu'on puisse en tirer des indications utilisables sur la manière dont ces instruments se comportent dans la pratique courante des mesures anémométriques, il serait indispensable : 1^o de connaître les relations qui existent entre les données fournies par les anémomètres à comparer, la vitesse du vent et l'inclinaison de celui-ci quand l'état permanent est établi; 2^o de réaliser un appareil d'inertie très faible et capable d'indiquer à tout instant la vitesse et la direction du vent dans l'espace. Peut-être alors serait-il possible de déterminer dans quelle mesure la variabilité du vent affecte les indications de nos anémomètres et d'arriver à fixer le degré de précision des mesures anémométriques.

⁽¹⁾ HASENKAMP, *Untersuchungen über die Methode der Anemometerprüfung mit dem Rotations-Apparate* (Archiv der deutschen Seewarte, Jahrg. XIII, Hambourg 1890).

Ces deux problèmes préliminaires peuvent être abordés actuellement dans les laboratoires aérodynamiques. Le présent Mémoire est consacré à l'exposé des recherches effectuées en vue d'arriver à résoudre le premier ⁽¹⁾. Il se divise en trois parties. La première contient un historique abrégé de l'anémométrie. Les deux autres sont constituées par mes propres recherches et ont trait, la seconde à l'étude expérimentale des moulinets anémométriques dans des courants d'air permanents de vitesse et d'inclinaison différentes, la troisième aux changements qu'éprouve la résistance d'un hémisphère et d'un hémicylindre creux placés dans l'air en mouvement quand on fait varier l'angle d'attaque.

PREMIÈRE PARTIE.

HISTORIQUE DE L'ANÉMOMÉTRIE.

CHAPITRE I.

LES DIVERS TYPES D'ANÉMOMÈTRES ET LEUR HISTORIQUE.

Utilité de l'étude historique de l'anémométrie. — Avant de se livrer à des recherches fructueuses sur des questions aussi complexes que celles que soulève l'anémométrie, questions sur lesquelles l'ingéniosité des inventeurs s'est exercée pendant plus de deux siècles, il est indispensable de bien connaître les diverses voies que l'on a suivies pour arriver aux formes d'anémomètres actuellement en usage. Cette manière de faire évite au chercheur des tâtonnements souvent décourageants et, en le faisant profiter de l'expérience de ses devanciers, abrège notablement son travail en lui montrant les causes d'erreur dont il doit se garder. On ne trouve malheureusement en français aucun ouvrage récent sur les anémomètres et les recherches auxquelles ils ont donné lieu. C'est pourquoi j'ai cru utile de combler cette lacune en donnant un aperçu général de l'histoire de l'anémométrie.

⁽¹⁾ En réalité j'ai pu mener de front l'étude de ces deux problèmes et le second s'est trouvé résolu en même temps que le premier. Les principes sur lesquels est basé l'instrument que j'ai réalisé ont été exposés devant la Société météorologique de France le 6 janvier 1920 (voir *Ann. Soc. mét. de France*, LXIV, p. 51). Cet instrument fera l'objet d'un Mémoire ultérieur dans lequel seront donnés tous détails utiles sur son étalonnage et son fonctionnement.

Premier stade de l'anémométrie : les échelles anémométriques. — Grâce aux actions exercées par le vent sur le corps humain, les arbres, les fumées et en général sur les objets qui constituent notre entourage, tout le monde sait apprécier si le vent est nul, faible, moyen, fort ou violent. Ce sont ces appréciations dont l'usage remonte vraisemblablement à l'antiquité la plus reculée, qui constituent le premier stade de l'anémométrie. On voit immédiatement que ces mesures rudimentaires ne peuvent être comparables entre elles que si les divers individus qui les font ou les utilisent se sont au préalable bien entendu sur la signification des termes qu'ils emploient et sur les phénomènes qui leur servent de base pour déclarer que le vent est nul, moyen ou violent. Autrement dit, il est nécessaire d'établir un ensemble de règles, un code, suivant lequel seront faites les diverses appréciations.

Ce n'est qu'à la fin du XVIII^e siècle que fut faite la première tentative de codification des estimations de la force du vent. Vers 1780, l'Association météorologique de Mannheim adoptait une échelle anémométrique dont l'usage avait été introduit par les observateurs d'Upsal et qui comportait 5 degrés : 0, calme; 1, faible ou modéré; 2, fort; 3, très fort; 4, violent. Mais cette échelle a été détrônée par celle de Beaufort dont l'usage a été introduit par son auteur dans la marine britannique vers 1800. Elle comprend 13 degrés s'étendant depuis le calme, noté 0, jusqu'à l'ouragan, noté 12, et sert actuellement en Europe pour la transmission des observations par télégraphe avec la seule modification que les degrés 9, 10, 11 et 12 sont confondus en un seul caractérisé par le chiffre 9 et correspondant aux vents violents. Pour les observations faites dans les stations climatologiques, on se sert fréquemment d'une autre échelle dite *échelle terrestre*. Cette échelle ne comprend que 7 degrés (0 à 6); chacun des six derniers correspond à 2 degrés de l'échelle de Beaufort.

L'adoption des échelles anémométriques, à défaut de procédés de mesure plus précis, a fait faire un notable progrès à l'anémométrie en rendant les observations comparables. Actuellement, c'est encore le plus souvent à l'estime que le vent est mesuré dans un grand nombre de stations et il est rare que des observateurs exercés fournissent pour une même vitesse du vent des appréciations simultanées différant de plus de 1 degré de l'échelle de Beaufort.

Classification des anémomètres. — Nous avons vu que les divers anémomètres pouvaient être répartis en trois grandes classes suivant la nature de l'effet utilisé pour la mesure de la force du vent :

Ce sont les anémomètres à pression, les anémomètres à rotation et les anémomètres à refroidissement.

La plupart des appareils anémométriques susceptibles de fournir des résultats suffisamment précis rentrent dans l'une de ces catégories, mais leur multiplicité

est telle que, pour plus de clarté, il est utile de diviser chacune d'elles en sous-groupes d'après la manière dont sont utilisés les effets produits par le vent pour mesurer son intensité.

Nous adopterons la classification suivante :

I. Anémomètres à pression :

- a. Anémomètres à pendule.
- b. Anémomètres à plaque normale.
- c. Anémomètres tubulaires.
- d. Anémomètres bridés.

II. Anémomètres à rotation ou anémomètres de vitesse :

- e. Anémomètres à axe parallèle au vent.
- f. Anémomètres à axe perpendiculaire au vent.

III. Anémomètres à refroidissement :

- g. Anémomètres-thermomètres.
- h. Anémomètres à fil chaud.

Nous laisserons de côté les anémomètres musicaux qui ne constituent qu'une simple curiosité et nous insisterons spécialement sur les instruments appartenant à la deuxième classe qui rentrent plus spécialement dans le cadre de ce travail.

I. — Anémomètres à pression.

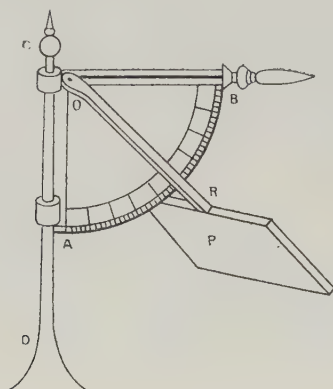
a. *Anémomètres à pendule.* — L'histoire de l'anémométrie de précision commence avec l'anémomètre à pendule décrit par Robert Hooke en 1667 dans les *Instructions for Seamen*. Il se compose d'une plaque P fixée à l'extrémité d'une tige OR mobile autour d'un axe horizontal O et se déplaçant le long d'un arc de cercle divisé AB. Cet ensemble est mobile autour d'un pivot vertical CD et s'oriente à la manière d'une girouette de façon que la plaque P soit placée face au vent. La force de celui-ci est mesurée par l'angle que fait la tige OR avec la position qu'elle occupe en air calme.

C'est l'instrument qui a servi de type aux divers anémomètres à pendule qui ont vu le jour par la suite, depuis celui de Pickering (1744) jusqu'à ceux de Wild (1861) et de Prestel (1865) en passant par ceux de Dalberg (1780), ensemble compliqué de mécanismes combinés, d'après Brewster, « sans discernement ni ingéniosité » et de Schmidt (1828) qui en a fait comme Pickering un instrument donnant les maxima.

Quand le vent change rapidement de direction, il devient difficile de main-

tenir la plaque exactement tournée face au vent. Pour remédier à cet inconvénient, on a songé à la remplacer par une sphère sur laquelle, par raison de symétrie, l'action du vent est la même quelle que soit la direction d'où il souffle : cette idée, due à Parrot ⁽¹⁾, a été réalisée par Howlett en 1868 ; elle a été

Fig. 2.



Anémomètre de Hooke.

reprise dans ces dernières années en France par Daloz ⁽²⁾. Mais les mesures faites avec de tels dispositifs ne peuvent être acceptées que sous réserve ; les recherches sur la résistance des corps sphériques placés dans l'air en mouvement ont montré, en effet, qu'une même déviation de la sphère peut correspondre à des valeurs différentes de la vitesse du vent ⁽³⁾. D'ailleurs leur emploi ne s'est guère répandu.

La modification imaginée par Draper en 1872 n'a pas non plus été consacrée par la pratique. Son anémomètre comportait un cylindre intercalé entre deux chaînes. L'une de celles-ci était suspendue à un support rigide. L'autre servait à enregistrer les déplacements subis par le cylindre sous l'action du vent.

b. Anémomètres à plaque normale. — Ce qui caractérise ces instruments, c'est que la plaque, au lieu de s'incliner plus ou moins suivant que la force du vent est plus ou moins grande, est assujettie à rester verticale et à s'orienter face à la direction d'où soufflent les courants aériens. La pression qu'elle subit de la part de l'air en mouvement est équilibrée par l'action d'un ressort ou d'un poids agissant à l'extrémité d'un bras de levier variable.

Le premier modèle de ce type est signalé dans le *Theatrum machinarum*

⁽¹⁾ Voigts Magazin, L, 1797, p. 153.

⁽²⁾ Catalogue de la maison J. Richard, Météorologie, Paris, 1914.

⁽³⁾ G. EIFFEL, Sur la résistance des sphères dans l'air en mouvement (C. R. Acad. Sc., t. 155, 1912, p. 1597).

generale de Leupold, paru à Leipzig en 1724. En 1746, Bouguer, dans son *Traité du Navire*, décrit un anémomètre à plaque portatif formé d'une feuille de carton fixée à une tige perpendiculaire à son plan et appuyant sur un ressort contenu dans un tube. Divers essais dus à l'abbé Nollet (1770), au colonel Demenge (1780), à Kirwan (1810) et à Beaufoy (1821), forment la transition entre cet appareil et l'anémomètre enregistreur à plaque d'Osler (1836) qui a été pendant longtemps employé comme étalon en Angleterre et dans un certain nombre d'observatoires du continent.

Dans cet instrument, la plaque est séparée de la girouette, mais portée par le même axe vertical; la pression du vent est équilibrée par des ressorts placés à l'arrière; les déplacements de la plaque sont transmis à l'enregistreur par une chaîne traversant la tige creuse qui sert de support au dispositif. Celui-ci permet d'inscrire à la fois la direction et la pression du vent.

En 1850, Jelinek modifie l'anémomètre d'Osler en entourant les ressorts par un cylindre clos à sa partie postérieure et dont la base antérieure est formé par la plaque de pression. L'action du vide partiel produit derrière la plaque est ainsi éliminée. En 1864, Cator remplace le cylindre par un cône et les ressorts par un poids agissant à l'extrémité d'un bras de levier de longueur variable. Depuis cette époque, l'emploi de l'anémomètre à plaque normale semble avoir été en déclinant malgré les perfectionnements que divers inventeurs y ont apportés et dont le dernier en date paraît être celui de Baxendell qui remonte à 1903 ⁽¹⁾.

Dans tous ces instruments, la pression du vent est mesurée par la tension d'un ressort ou la longueur d'un bras de levier variable à l'extrémité duquel agit un poids constant. Parallèlement à ces tentatives, d'autres inventeurs cherchaient à mesurer cette pression par un procédé manométrique. Dès 1785, Wilke proposait de placer derrière la plaque un sac de cuir rempli de mercure et relié à un tube vertical étroit contenant de l'alcool coloré. La plaque pressant sur le mercure produit des variations de hauteur de la colonne d'alcool qui sont fonction de la force du vent. Quarante ans plus tard, Pujoux reprit la même idée en remplaçant le sac de mercure par une vessie remplie d'air.

Ces instruments forment la transition entre les anémomètres à plaque normale et les anémomètres tubulaires.

c. Anémomètres tubulaires ou anémomanomètres. — Les anémomètres tubulaires utilisent les effets de compression et d'aspiration que produit le vent en

(1) JOS. BAXENDELL, *Description of the Dines-Baxendell anemograph and the Dial Pattern non oscillating pressure-plate anemometer* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. XXIX, 1903, p. 289-298).

agissant sur des ajutages de forme appropriée et convenablement orientés. On peut en distinguer trois variétés :

- 1^o Ceux qui n'utilisent que les effets de compression;
- 2^o Ceux qui n'utilisent que les effets d'aspiration;
- 3^o Ceux qui utilisent à la fois ces deux effets.

1^o Le premier en date de ces appareils est décrit par Leupold dans son *Theatrum staticum* (Leipzig, 1726), il était constitué par un entonnoir placé face au vent et adapté sur un flacon contenant un liquide dans lequel plongeait un tube vertical. La force du vent était mesurée par la hauteur du liquide soulevé dans ce dernier. Lind, en 1775, emploie un tube en U ouvert à ses deux extrémités et dont l'une des branches est coudée en angle droit à sa partie supérieure. Ce tube en U est porté par une girouette de manière que la branche coudée présente toujours son ouverture au vent. La partie inférieure de l'U contient de l'eau et la différence des niveaux occupés par ce liquide dans les deux branches sert à mesurer la force des courants aériens. Après diverses modifications de détail dues à Snow Harris et à Forbes, et dispositif, qui fut à un moment donné très répandu en Angleterre, finit par être abandonné.

Le baromètre différentiel de Wollaston est de 1829; réinventé par Ramsbottom en 1866 il n'est au point de vue anémométrique que l'adaptation d'un manomètre différentiel très sensible à l'anémomètre de Lind. En 1835, Adie se sert d'un tube à ouverture évasée orientée par une girouette. Ce tube aboutit à l'intérieur d'une cloche cylindrique reposant sous l'eau, les variations de hauteur de cette espèce de gazomètre servent à repérer la force du vent.

2^o En 1867, Fletcher mesure cet élément par l'aspiration qu'il détermine dans un tube cylindrique vertical ouvert à sa partie supérieure, le plan de l'ouverture étant parfaitement horizontal, et dont l'extrémité inférieure est reliée à un manomètre. Cet instrument, réinventé par Hagemann en 1876, porte le nom de ce dernier. C'est une modification de l'anémomètre de Lind rentrant dans la deuxième variété des anémomètres tubulaires.

En adaptant, à la partie supérieure du tube vertical, un ajutage de forme et d'orientation convenables, on peut augmenter notablement les effets de succion dus au vent. Dès 1854, Overduyn s'était servi dans ce but d'un tube de Venturi formé de deux troncs de cônes opposés par leur petite base et de hauteur et d'ouverture différentes. Cet ajutage est disposé de manière que le vent entre par le tronc de cône le plus court; l'aspiration est maximum au point où la veine gazeuse est le plus contractée; c'est à cet endroit qu'Overduyn adaptait un tube relié à une petite caisse hermétiquement close contenant un baromètre anéroïde. Les différences entre la pression barométrique et celle qu'indique l'anéroïde sont fonction de la vitesse du vent.

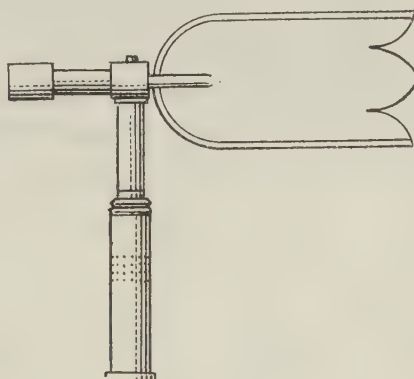
Arson, en 1875 ⁽¹⁾, propose de modifier l'ajutage de Venturi en remplaçant le tronc de cône arrière par un cylindre de manière à produire une augmentation brusque du diamètre, mais cette modification n'a fait l'objet d'aucune application pratique.

Overduyn avait montré que l'aspiration était beaucoup plus forte à l'étranglement d'un deuxième tube de Venturi convenablement disposé à l'intérieur du premier. Cette donnée a été utilisée par Bourdon dans son multiplicateur (1878) ⁽²⁾. Les variations de pression étaient enregistrées par l'intermédiaire d'un manomètre à tube elliptique dû au même inventeur.

Ce dispositif est tombé rapidement en désuétude; cependant le multiplicateur a été utilisé dans ses dernières années par MM. Toussaint et Lepère à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, et le Service météorologique militaire s'en est servi pour la construction d'un anémomètre (1918) qui ne diffère que par des détails de celui de Bourdon et possède le même défaut.

Ce défaut, connu depuis plus de 35 ans et qui est loin d'être négligeable, provient de ce que le manomètre destiné à enregistrer les variations de pression qui se produisent à l'étranglement du tube intérieur du multiplicateur, au lieu de donner la différence entre la pression en ce point et la pression statique de l'air en mouvement, donne en réalité la différence de pression entre l'atmosphère de la pièce dans laquelle il est installé et l'intérieur de l'ajutage dans lequel s'engouffre le vent. Or les variations de pression qu'il s'agit de mesurer, étant très faibles, sont affectées très notablement par celles que produisent dans l'atmosphère de la salle le tirage des cheminées, l'ouverture des portes et les actions d'aspiration et de compression exercées par le vent et variables suivant la direction d'où il souffle et suivant sa vitesse.

Fig. 3.



Anémomètre de Dines.

3° Cette imperfection est complètement évitée dans les anémomètres tubu-

⁽¹⁾ *Association française*, Nantes, 1875.

⁽²⁾ *C. R. Acad. Sc.*, t. 94, 1882, p. 229.

laire de la troisième espèce dont le type le plus répandu actuellement est l'anémomètre de Dines. Cet instrument, dont le premier modèle a été décrit par son auteur en 1892, se compose d'un tube ouvert horizontal orienté face au vent par l'intermédiaire d'une girouette et d'un second tube fermé à sa partie supérieure, mais percé de trous latéraux disposés en couronnes. La différence de pression existant entre les deux ajutages est enregistrée à l'aide d'un dispositif spécial dont les indications sont proportionnelles à la racine carrée de cette différence de pression.

d. Anémomètres bridés. — Les anémomètres bridés forment toute une catégorie d'instruments dans lesquels les organes destinés à mesurer la force du vent sont disposés de manière à communiquer à un axe un mouvement de rotation que l'on freine par une résistance susceptible de mesure. Quand l'équilibre est atteint, le moment par rapport à l'axe de la pression exercée par le vent sur l'organe sensible est égal à celui de la force antagoniste, d'où la possibilité de calculer le premier et par conséquent la force du vent.

Le premier type de ces appareils est celui de Christian Wolf (1708). Un ensemble d'ailettes convenablement disposées autour d'un axe est orienté par une girouette. Le mouvement de rotation que prend l'axe sous l'influence de l'action des courants aériens sur les ailettes se communique par des rouages à un pivot, muni d'une aiguille se déplaçant sur un cadran, et fait monter un poids dont le bras de levier par rapport à ce pivot croît très rapidement à mesure qu'il est soulevé. Quand le moment du poids équilibre celui qui résulte de la pression du vent sur les ailettes, le mouvement de rotation s'arrête et la position occupée par l'aiguille mesure la force du vent.

Les anémomètres de Gärthner et de Leutmann reposent sur le même principe.

Ce type n'a guère été employé et l'adoption des coupes hémisphériques pour la constitution de l'organe exposé à l'action du vent, par Francis Galton (1879) et Stokes (1881) ⁽¹⁾, n'a pu parvenir à en répandre l'usage.

II. — Anémomètres à rotation.

Mesure directe de la vitesse du vent. — Nous arrivons maintenant à une classe très importante d'instruments que l'on peut appeler *anémomètres de vitesse*, par opposition à ceux que nous avons vus jusqu'à présent. Ils sont construits en vue de mesurer le vent non par les effets de pression qu'il exerce sur une

⁽¹⁾ On trouvera une description de l'anémomètre bridé de Stokes dans un article de R.-H. CURTIS, *Characteristic features of gales and Strong winds* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. XX, p. 262-269).

certaine surface ou par l'aspiration ou la compression qu'il produit dans des ajutages convenables, mais par la vitesse du mouvement qu'il communique à un système de surfaces convenablement disposées et orientées, le plus souvent assujetties à tourner autour d'un axe.

Le procédé le plus simple qui se présente à l'esprit pour déterminer la vitesse d'un courant d'air consiste à mesurer l'espace parcouru en un temps donné par un corps très léger emporté par ce courant. C'est le procédé dont se servait Mariotte dès 1680. Repris par Derham en 1708, il est encore appliqué aujourd'hui à la mesure de la vitesse des courants supérieurs de l'atmosphère à l'aide des ballons-pilotes.

En 1733, Bouvet modifie ce procédé primitif et calcule la vitesse du vent par le temps que met à parcourir une longueur donnée d'un fil, tendu dans la direction des filets d'air, un disque de liège empenné assujetti à se mouvoir le long de ce fil. Cette méthode est de nouveau préconisée par Snow Harris en 1840 ⁽¹⁾. Elle n'a jamais été employée pour des mesures suivies.

Premiers types d'anémomètres à rotation. — Jusqu'à présent le seul moyen pratique dont l'usage se soit répandu pour la détermination directe de la vitesse du vent consiste dans l'emploi des anémomètres à rotation.

Le premier de ces instruments serait, d'après Laughton ⁽²⁾, celui de Dinglinger, mentionné par Leupold en 1742, et dont l'invention remonterait aux environs de l'année 1720, mais il n'est pas certain que l'instrument dont parle Leupold en 1724 n'est pas le même que celui qu'il décrit en 1726 sous le nom de *Gärthner* et qui appartient à la classe des anémomètres bridés; de sorte qu'il paraît vraisemblable que le premier type bien défini d'anémomètre à rotation est l'anémomètre pendule de d'Ons en Bray (1734) ⁽³⁾. C'était un instrument compliqué enregistrant à la fois la direction du vent et sa vitesse. Cette dernière donnée était fournie par la rotation continue d'un moulinet spécial appelé par son auteur *moulin à la polonaise*. Il ne semble pas que cet appareil ait jamais été utilisé pour des mesures suivies.

En 1751, Lomonosow emploie un anémomètre unique en son genre et dont il est difficile de dire s'il appartient à la classe des anémomètres à rotation ou à la catégorie des anémomètres bridés. Il se compose d'une roue à aubes montée sur une girouette de manière que son axe soit toujours horizontal et perpendiculaire au vent. La moitié inférieure de cette roue est abritée par une caisse fermée à sa partie inférieure et le mouvement qu'elle prend lorsque souffle

(1) Nous verrons dans le Chapitre II de la deuxième Partie que certains anémomètres à rotation peuvent être considérés comme dérivant directement de ces expériences.

(2) LAUGHTON, *Historical Sketch of Anemometry and Anemometers* (loc. cit.).

(3) *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, p. 123.

le vent est transmis à un disque par un ensemble de rouages. Pour étalonner l'instrument, on compare la vitesse de rotation de ce disque à la vitesse du vent mesurée par le procédé de Mariotte.

e. Anémomètres à axe parallèle au vent. — Tous ces instruments ne présentent qu'un intérêt historique et méritent à peine le nom d'*anémomètres* : il faut arriver jusqu'à l'an 1752 pour trouver le premier dispositif permettant de mesurer le vent par la rotation continue d'un organe convenablement orienté. Il est dû à Schober et comporte un moulinet formé de quatre lames métalliques légères fixées aux extrémités de deux bras disposés en croix et inclinées d'environ 38° sur le plan passant par ces derniers. Ce moulinet, monté sur un axe dirigé parallèlement au vent, communiquait à cet axe un mouvement de rotation continu dont on pouvait mesurer la vitesse grâce à un petit marteau qui venait frapper une clochette chaque fois que le moulinet avait accompli six révolutions.

L'anémomètre de Schober ne fut guère employé pas plus que celui du même genre que proposa Edgeworth en 1783.

En 1790, Woltmann donna une théorie de ces instruments et, à la suite d'une série de recherches expérimentales, modifia les dimensions du moulinet et l'inclinaison des palettes. Il trouva que celle-ci devait être ramenée à $41^{\circ} 30'$ et que, dans les conditions où il opérait, la vitesse du vent V était représentée en fonction de la vitesse linéaire du centre des ailettes v par une équation de la forme

$$V^2 = v^2 + a^2,$$

a étant une certaine constante dépendant de la densité de l'air et du frottement de l'axe sur ses coussinets.

En 1820, Kallstenius porta à 12 le nombre des pales et leur donna une inclinaison de 53° (37° par rapport à l'axe).

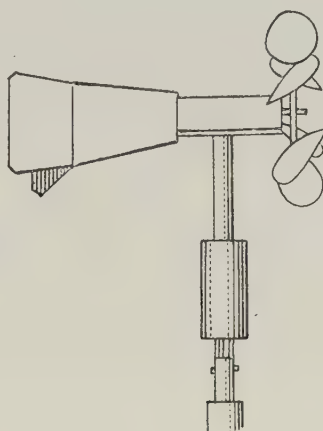
Les anémomètres de Combes et de Whewell (1837), qui furent à un moment donné très employés en France et en Angleterre, ne sont que des modifications de l'anémomètre de Schober-Woltmann. L'instrument de Combes, dont le Bureau Central météorologique possède encore un modèle construit par Bréguet et portant le n^o 65 122, comportait quatre ailettes carrées très légères de $22^{\text{mm}},5$ de côté portées par deux bras en croix et inclinées de 29° sur le plan de ces derniers. Leur centre se trouve placé à $26^{\text{mm}},25$ de l'axe de rotation constitué par une mince tige d'acier munie d'une vis sans fin qui actionne un mécanisme permettant de compter le nombre de tours faits par l'organe sensible en un temps donné. D'une série d'expériences d'étalonnage faites au manège, Combes conclut que la vitesse du vent V pouvait se déduire de la vitesse de rotation de l'appareil par une formule linéaire : $V = a + bn$, dans laquelle n

représente le nombre de tours du moulinet par unité de temps, a et b étant deux constantes.

Les appareils anémométriques connus sous le nom d'*anémomètres à main* ne sont pour la plupart que des modifications de cet instrument.

En 1843, Biram eut l'idée de remplacer les ailettes planes par des ailettes gauches. Mais c'est J. Richard qui paraît avoir adopté le premier les ailettes de forme hélicoïdale nettement définie. Cet habile constructeur français eut l'idée de les constituer par des portions de la surface d'un hélicoïde ayant 1^m de pas et d'adapter au moulinet un mécanisme extrêmement ingénieux (cinémographe) capable d'enregistrer toutes les variations de sa vitesse de rotation. Le moulinet, grâce à sa légèreté, suit sensiblement les variations de la vitesse du vent. Il s'ensuit qu'en tarant préalablement le cinémographe, on peut lire directement sur le diagramme qu'il fournit la vitesse du vent exprimée en mètres par seconde.

Fig. 4.



Anémomètre Richard.

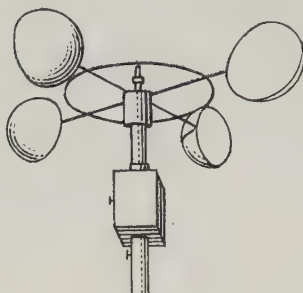
On peut rapprocher de l'anémomètre Richard l'appareil conçu par Dines (1887) et auquel il a donné le nom d'*anémomètre hélicoïdal auto-réglable* ⁽¹⁾.

f. Anémomètre à axe perpendiculaire au vent. — Les moulinets dont l'histoire vient d'être brièvement retracé exigent que leur axe soit dirigé parallèlement au courant dont on désire connaître la vitesse. Il faut donc les monter sur une girouette si l'on désire faire des mesures continues. C'est là une complication que l'on peut éviter par l'emploi du moulinet inventé par Robinson en 1846 et universellement connu sous le nom de *moulinet à coupes hémis-*

⁽¹⁾ W. H. DINES, *A new form of velocity anemometer* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. XIII, 1887).

phériques ou *moulinet Robinson*. Sa robustesse et la commodité de son emploi l'ont fait adopter dans la plupart des services météorologiques et, à l'heure actuelle, c'est encore l'anémomètre Robinson (voir *fig. 5*) et ses modifications qui sont les plus répandus pour la mesure de la vitesse du vent.

Fig. 5.



Anémomètre Robinson.

Le moulinet à coupes hémisphériques, dont la première idée paraît appartenir à Edgeworth, se compose de quatre hémisphères creux fixés aux extrémités de quatre bras disposés en croix et dans le même plan horizontal autour d'une tige verticale formant pivot. Le plan de base des coupes est disposé verticalement et un observateur se déplaçant autour du moulinet rencontre toujours dans le même ordre le côté concave et le côté convexe des hémisphères successifs.

Si l'on considère deux coupes diamétralement opposées, on voit que, par suite de cette disposition, l'une d'elles présente sa concavité au vent, tandis que l'autre lui offre son côté convexe. Comme la résistance de la première au mouvement de l'air est plus grande que celle de la seconde, le dispositif prend un mouvement de rotation dont la rapidité est fonction de ses dimensions et de la vitesse du vent. De ses premières expériences Robinson avait conclu que la vitesse linéaire du centre des coupes était très sensiblement égale au tiers de la vitesse du vent, et, depuis cette époque, la plupart des anémomètres genre Robinson ont été construits sur cette donnée quoiqu'il soit démontré depuis environ 50 ans que la manière dont se comportent les moulinets à coupes hémisphériques diffère notablement de l'idée que l'on s'en était faite d'après les premières indications fournies par l'inventeur. On en a fait de toutes les tailles depuis celle du Kew-Standard, établi par Beckley et installé à l'Observatoire de Kew en 1856, dont les coupes ont 9 inches de diamètre ($228^{\text{mm}},6$) et dont le diamètre mesuré de centre en centre de deux hémisphères opposés atteint 48 inches ($1^{\text{m}},219$), jusqu'à celle de l'anémomètre de voyage de Fuess (*Reise-anemometer*) dont le diamètre est de 34^{mm} et qui comporte des coupes de 22^{mm} .

La vitesse de rotation de la partie tournante est mesurée, soit par un compteur de tours actionné par une vis sans fin, soit par un cinémographe (Richard), soit au moyen d'un régulateur de Watt (Maurer) ⁽¹⁾, soit par le voltage aux bornes d'une magnéto dont l'induit est entraîné par l'axe (Richard) ⁽²⁾.

Diverses modifications du moulinet Robinson ont été tentées en remplaçant les coupes par des hémicylindres ou des cônes. Mais leur emploi est resté tout à fait restreint.

III. — Anémomètres à refroidissement.

g. Anémomètres-thermomètres. — C'est à Leslie que revient l'idée de mesurer la vitesse du vent en déterminant la rapidité avec laquelle s'abaisse la température d'un corps chaud exposé au vent. Il a proposé dès 1804 d'employer à cet usage un thermomètre à gros réservoir préalablement chauffé à une température supérieure d'une quantité connue à celle de l'air. Ce procédé fut étudié de nouveau par Phillips en 1846-1848-1849 et dans ces dernières années (1915) par Hill, Griffith et Flack ⁽³⁾.

Ces derniers auteurs ont également proposé de se servir d'un thermomètre à réservoir mouillé.

h. Anémomètres à fil chaud. — Les anémomètres à fil chaud n'ont fait leur apparition que peu d'années avant la dernière guerre. Dans ces appareils, la mesure de la vitesse du vent est effectuée en déterminant la perte de chaleur que subit, par unité de temps, de la part de l'air en mouvement, un fil fin de platine formant l'une des branches d'un pont de Wheatstone. La première tentative de ce genre est due à G.-A. Shakespear et remonte à 1902. La question a été ensuite étudiée par nombre d'auteurs parmi lesquels on peut citer : Kennelly, Bordoni, Morris, Gerdien, mais s'est L.-V. King qui paraît avoir rendu vraiment pratique la mesure de la vitesse des courants d'air par le moyen d'un fil chauffé ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ *Die Verwendung des Watt'schen pendels zur kontinuierlichen mechanischen Registrierung des Robinson'schen Schalenkreuzes* (Zeitsch. für Instr., III, 1883, p. 189-192).

⁽²⁾ Ce dispositif a été également appliqué à l'anémomètre à moulinet Richard (1913).

⁽³⁾ HILL, GRIFFITH et FLACK, *The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation* (Phil. Trans. Roy. Soc., vol. 207, p. 261, London, 1915).

⁽⁴⁾ Voir *On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid : determination of the convection constants of small platinum wires, with applications to hot-wire anemometry* (Phil. Trans. Roy. Soc., vol. 214, p. 373-452, London, 1914). On trouvera des renseignements bibliographiques sur la question dans un Mémoire du même auteur : *On the precision measurement of air velocity by means of the Linear Hot Wire anemometer* (Phil. Mag., 1915, p. 556) et dans un travail de F.-S.-G. THOMAS, *The Hot-Wire anemometer : its applications to the investigation of the velocity of gases in pipes* (Phil. Mag. 1920, p. 505-534).

Sans insister davantage sur les anémomètres à refroidissement qui sont encore à l'heure actuelle des instruments de laboratoire plutôt que des appareils destinés aux usages météorologiques, nous allons exposer succinctement les principales recherches auxquelles ont donné lieu les dispositifs employés par les météorologistes pour mesurer la vitesse du vent ⁽¹⁾.

CHAPITRE II.

RECHERCHES ANTÉRIEURES SUR LES ANÉMOMÈTRES EMPLOYÉS EN MÉTÉOROLOGIE.

Classification des recherches. — Les instruments employés pour la mesure de la vitesse du vent naturel ont fait l'objet de nombreuses recherches. Celles-ci se classent tout naturellement en trois groupes d'après la méthode adoptée par leurs auteurs.

- I. Recherches expérimentales faites à l'air libre ;
- II. Recherches expérimentales faites en déplaçant l'anémomètre par rapport à l'air ambiant maintenu à l'état de repos ;
- III. Recherches théoriques.

L'anémomètre Robinson étant le plus répandu, c'est sur les instruments de ce modèle qu'ont surtout porté les efforts des chercheurs.

I. *Recherches à l'air libre.* — Si l'on disposait d'un anémomètre parfait capable de définir à tout instant le vecteur vitesse du vent, il serait possible d'arriver à déterminer d'une manière suffisamment précise la valeur des indications des divers anémomètres placés dans le vent naturel par une série de comparaisons plus ou moins longue. Comme ce n'est malheureusement pas le cas, les auteurs qui se sont livrés à des comparaisons à l'air libre ont dû se borner à choisir arbitrairement comme étalon l'un des appareils étudiés. Sous cette forme imparfaite, ces études ont cependant été très utiles en montrant les divergences qui existent entre les mesures de la vitesse du vent faites à l'aide d'anémomètres différents. Les divergences observées ont fait voir la nécessité de nouvelles recherches et ont provoqué un grand nombre de travaux dans le but, soit de les expliquer, soit de les corriger.

(1) On trouvera une bibliographie détaillée concernant l'histoire des anémomètres depuis l'origine jusqu'à 1881 à la fin du Mémoire de LAUGHTON : *Historical Sketch of Anemometry and Anemometers* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. VII, 1882, p. 161-189).

Les premiers en date et les plus importants par la répercussion qu'ils ont eue sur les progrès de l'anémométrie sont ceux du Rév. Fenwick Stow ⁽¹⁾.

Il fit en 1870 et 1872, dans un endroit bien découvert, une série de comparaisons entre des anémomètres Robinson de différentes dimensions en adoptant comme étalon un instrument du même modèle que le Kew-Standard et en admettant que, pour tous, la vitesse du vent s'obtenait en multipliant par le facteur 3 la vitesse linéaire du centre des coupes.

Les expériences mirent en évidence les résultats suivants :

1° La plupart des petits instruments donnent des vitesses moyennes inférieures de 15 à 25 pour 100 à celles indiquées par le modèle de Kew.

2° Si l'on examine le rapport entre les indications d'un anémomètre donné et celles de l'étalon, on trouve qu'il varie avec la vitesse du vent et décroît à mesure que celle-ci augmente.

3° Cette variation est d'autant plus accusée que le quotient

$$\frac{\text{Diamètre des coupes } (d)}{\text{Diamètre du moulinet } (D)}$$

est plus grand.

Pour expliquer ces phénomènes, Stow invoque l'influence du frottement de l'axe sur ses coussinets et l'action des coupes les unes sur les autres, celles-ci s'abritant mutuellement contre l'action du vent, et cet effet étant d'autant plus prononcé que les bras sont plus courts relativement au diamètre des hémisphères.

Deux autres séries de comparaisons furent faites à Petrograd en 1873-1874 et en 1877-1878 par Dohrandt ⁽²⁾. Ces expériences avaient surtout pour but de déterminer les constantes de certains anémomètres en les comparant à d'autres préalablement étalonnés au manège.

En 1889 et 1890, des mesures comparatives furent faites par M. Angot au Bureau Central météorologique et à la Tour Eiffel entre l'anémomètre Richard et des anémomètres Robinson ⁽³⁾. Elles montrèrent qu'une bonne lubrification des coussinets était indispensable pour assurer la comparabilité des observations faites à l'aide d'un même instrument à coupes.

On doit à W. H. Dines une très intéressante étude faite à l'air libre à Hersham en 1890 et 1891 ⁽⁴⁾. Les instruments, installés à 9 pieds (5^m,48) au-dessus d'un toit comprenaient :

a. Un Kew-Pattern Robinson;

⁽¹⁾ *On large and small anemometers* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. I, 1872, p. 41).

⁽²⁾ DOHRANDT, *Bestimmung der Anemometer-Konstanten* (Rep. f. Met., IV, n° 3, et VI, n° 5).

⁽³⁾ A. ANGOT, *Observations météorologiques faites au Bureau Central météorologique et à la Tour Eiffel* (Ann. du B. C. M., t. I, 1888; t. I, 1889; Paris, 1891 et 1892).

⁽⁴⁾ W. H. DINES, *Anemometer comparisons* (Quart. Journ. Roy. Met. Soc., vol. XVIII, 1892, p. 65-183).

- b. Un anémomètre hélicoïdal auto-réglable;
- c. Un « air-meter »;
- d. Une plaque circulaire d'un pied carré;
- e. Un anémomètre tubulaire Dines,

et avaient été tarés préalablement sur un manège.

Ces expériences ont mis en évidence un certain nombre de faits dignes de remarque.

1^o Par vents faibles, les anémomètres de pression donnent des indications trop élevées, les anémomètres de vitesse des indications trop basses. La différence entre ces deux catégories d'appareils s'annule pour les vents forts.

2^o Le fonctionnement du Robinson et des instruments à pression est affecté par la variabilité de la vitesse. Il ne semble pas qu'il en soit de même pour l'anémomètre auto-réglable et l'air-meter. Les premiers ont tendance à donner des indications trop élevées par vent variable, mais cet effet décroît à mesure que la vitesse moyenne du courant augmente.

3^o Le Robinson et les anémomètres à pression ne sont pas influencés par les variations de la direction qui, au contraire, tendent à rendre trop basses les indications des autres appareils.

Quant au facteur par lequel il faut multiplier la vitesse linéaire du centre des coupes du Kew-Pattern pour trouver la valeur vraie de la vitesse du vent, il n'est pas constant et varie entre 2 et 2,27. L'auteur pense qu'en adoptant la valeur 2,10 les nombres obtenus ne doivent pas s'écarter de la vérité de plus de 5 pour 100.

La même année, Whipple compare un anémocinémographe Richard au Robinson étalon de Kew. Le rapport des vitesses moyennes données par le premier instrument à celles déduites des mesures faites à l'aide du second varie de 0,88 (vitesse lue au Kew-Standard : 6 miles à l'heure) à 0,80 (vitesse mesurée au Kew-Standard : 42 miles à l'heure).

D'études semblables faites par Curtis en 1895 à Scilly sur un anémomètre de Dines et un Robinson ayant 18 inches de diamètre et muni de coupes de 5 inches, il ressort que le coefficient de ce dernier instrument varie avec la vitesse du vent et passe par un maximum égal à 3 pour les vitesses comprises entre 10 et 25 miles à l'heure. On doit au même expérimentateur des essais comparatifs faits à Holyhead sur l'anémomètre bridé de Stokes d'une part et l'anémomètre de Dines d'autre part. De ces essais il résulte que les vitesses moyennes indiquées par les deux dispositifs diffèrent d'une quantité constante qui peut être considérée comme provenant d'une détermination inexacte du 0 de l'anémomètre bridé. En ce qui concerne les maxima, ceux qu'indique ce dernier sont plus

élevés que ceux qu'enregistre l'anémomètre tubulaire et semblent se rapprocher davantage de la réalité.

Hazen ⁽¹⁾ a essayé trois anémomètres à coupes de dimensions différentes placés à 20 pieds au-dessus d'un toit. Il trouve que les rapports $\frac{V}{v}$ de la vitesse du vent V à la vitesse linéaire des coupes v dépend de V et va en diminuant quand V augmente. Il pense que le facteur du Kew-Pattern doit être compris entre 3 pour les vents faibles (5 miles à l'heure) et 2,10 pour les vents forts (25 miles à l'heure).

A la même époque, Marvin ⁽²⁾ étudie simultanément le fonctionnement dans le vent naturel de l'instrument du Signal Service ⁽³⁾ et d'un anémomètre très léger muni de coupes coniques en papier préalablement taré au manège. Dans la plupart des cas, les vitesses données par le Robinson du Signal Service sont supérieures de 10 pour 100 à celles que l'on relève sur l'autre. Cette différence ne paraît pas dépendre de la moyenne des vitesses du vent pendant l'expérience, mais de la variabilité de celle-ci. Elle s'exagère si l'on augmente le moment d'inertie du premier instrument. C'est d'ailleurs ce que permet de prévoir le fait bien connu qu'un moulinet Robinson une fois lancé continue à tourner en air calme pendant un temps d'autant plus long que son moment d'inertie est plus grand. Marvin conclut de ses expériences que de nombreuses mesures faites à l'air libre dans des conditions très variées seraient nécessaires pour obtenir l'équation approchée de l'anémomètre du Signal Service.

De 1892 à 1895, S. P. Fergusson a fait à Blue-Hill de nombreuses comparaisons entre un Kew-Pattern, deux Robinson modèle du Signal Service dont les coupes étaient faites pour l'un en aluminium et pour l'autre en cuivre, deux anémomètres hélicoïdaux auto-réglables différant l'un de l'autre par la matière ayant servi à la fabrication de leurs ailettes (cuivre pour l'un, aluminium pour l'autre) et un anémomètre Richard.

D'une première série de mesures faites en 1892 ⁽⁴⁾, cet auteur conclut que l'instrument du Weather Bureau (anémomètre du Signal Service) donne des vitesses plus élevées que l'anémomètre hélicoïdal et que l'excès de ses indications croît à mesure que la vitesse du vent augmente. Si celles-ci sont corrigées à l'aide de la table de Marvin, les vitesses obtenues sont au contraire trop basses sauf aux faibles vitesses. Le Robinson à coupes de cuivre fournit des nombres plus grands que celui muni de coupes d'aluminium pour des vitesses supérieures à 5 miles à l'heure. Au-dessous de cette limite, c'est l'inverse que l'on observe.

⁽¹⁾ *Americ. Met. Journ.*, V, p. 498.

⁽²⁾ *Amer. Met. Journ.*, V, p. 558 et suiv.

⁽³⁾ Diamètre de centre en centre des coupes : 13, 44 inches; diamètre des coupes : 4 inches.

⁽⁴⁾ S. P. FERGUSSON, *Anemometer comparisons* (*Amer. Met. Journ.*, IX, p. 427).

Dans le Mémoire beaucoup plus complet qu'il a publié en 1895 ⁽¹⁾, Fergusson sépare les comparaisons qui concernent le Kew-Pattern en deux catégories : l'une d'elles contient les mesures faites par vents variables, l'autre celles qui correspondent aux vents réguliers. Il trouve que, pour une même vitesse moyenne, les indications de l'instrument copié sur le Kew-Standard sont plus élevées dans le premier cas que dans le second.

L'auteur conclut de ses observations que les petits instruments sont les plus sensibles aux variations rapides de vitesse et que celles-ci affectent beaucoup moins les valeurs de la vitesse moyenne trouvées à l'aide des anémomètres à moulinet orienté face au vent que celles données par les Robinson.

Des résultats fournis par ces travaux, et des études poursuivies à la Deutsch Seewarte, Neumayer ⁽²⁾ déduisit que, pour étalonner un Robinson de grandes dimensions, le meilleur procédé consistait à le comparer dans le vent naturel à un instrument de modèle réduit taré au manège.

Cederström ⁽³⁾ a déterminé l'équation d'un Robinson ayant 39^{cm} de diamètre et pourvu de coupes de 11^{cm} en mesurant la vitesse du vent à l'aide de ballons-pilotes. Les vitesses, calculées d'après les tarages de l'instrument faits au manège et sur un train de chemin de fer, seraient supérieures à celles correspondant à l'étalonnage fait dans le vent naturel de 5 pour 100 à 10 m : sec et de 8 à 10 pour 100 à 20 m : sec.

Les dernières comparaisons d'anémomètres à l'air libre qui soient parvenues à ma connaissance sont celles de A. Norman Shaw ⁽⁴⁾. Elles ont porté sur un Robinson du modèle adopté par le Weather Bureau, sur un tube de Pitot, un anémomètre à fil chaud de King et un anémomètre-thermomètre (katharometer). L'auteur trouve que les vitesses moyennes calculées d'après la formule de Marvin à l'aide des indications du Robinson s'accordent bien avec celles que l'on déduit de l'observation d'un ballon-pilote. Tous les autres instruments essayés lui ont donné des résultats satisfaisants. On peut cependant se demander jusqu'à quel point il est légitime de comparer les vitesses mesurées avec les ballons employés par l'auteur et qui s'élevaient avec une vitesse de 80^m par minute avec les indications d'un Robinson placé à la hauteur de 40^m. Sur neuf comparaisons qu'il reproduit, on en trouve six pour lesquelles les mesures ont fourni exactement le même nombre, deux pour lesquelles l'écart est respec-

⁽¹⁾ S. P. FERGUSSON, *Anemometer Comparisons* (Ann. of the astronomical Observatory of Harvard College, vol. LX, Part 4 Appendix G.) : *Observations made at Blue-Hill meteorological Observatory in the year 1894*.

⁽²⁾ NEUMAYER, *Aus dem Archiv der D. Seew.*, Jahrg. 20, n° 4.

⁽³⁾ EINIL CEDERSTRÖM, *On moderna att profva anemometrarn* (Helsingfors, 1905).

⁽⁴⁾ *Notes on the comparison of anemometers under open-air conditions* (Monthly Weather Review, vol. XLVII, n° 1, 1919, p. 21.

tivement de 11 et de 12 pour 100 et un où il s'élève à plus de 66 pour 100 de la vitesse mesurée à l'aide du Robinson.

II. *Recherches faites au manège.* — Il semble que le premier anémomètre qui ait été étalonné au manège soit celui de Schober ⁽¹⁾. Woltmann ⁽²⁾, après avoir tenté l'emploi de ce procédé pour ses recherches, y renonça à cause des mouvements parasites communiqués à l'air de la salle d'expériences par la rotation du bras.

Combes ⁽³⁾ s'en servit ensuite pour établir la formule de son anémomètre, et Robinson ⁽⁴⁾ détermina par ce moyen le facteur par lequel il fallait multiplier la vitesse linéaire du centre des coupes des moulinets de son invention pour trouver la vitesse du vent.

En 1860, Glaisher eut l'idée de vérifier expérimentalement la constante du moulinet Robinson employé à l'observatoire de Greenwich ⁽⁵⁾. L'anémomètre ⁽⁶⁾ fut monté sur le bras d'un manège installé à l'air libre. On trouva que le coefficient était trop fort de 6 pour 100. Ce résultat fut considéré comme suffisant que pour l'on pût admettre les idées de Robinson. Aucune correction n'avait été apportée aux nombres expérimentaux en vue de tenir compte des mouvements parasites de l'air causés par la rotation du manège.

Cependant les résultats obtenus par Stow, en comparant les anémomètres à coupes dans le vent naturel, vinrent montrer l'utilité de reprendre les travaux de Robinson.

Dès 1872, des expériences furent entreprises dans ce but par Jeffery et Whipple sur un manège de chevaux de bois à vapeur installé à Crystal-Palace. Jugées insuffisantes par leurs auteurs, elles furent discutées en 1881 par Stokes ⁽⁷⁾ qui en tira les conclusions suivantes :

Le quotient

$$\frac{\text{Vitesse du vent (V)}}{\text{Vitesse linéaire du centre des coupes (v)}}$$

varie avec les dimensions des organes constituant le moulinet. Toutes choses égales d'ailleurs, ce sont les moulinets dont les coupes sont les plus grandes qui tournent le plus vite. Pour le Kew-Pattern, le facteur à employer est d'en-

(1) SCHOBBER, *Hamburger Magazin*, IX, Stück 2.

(2) WOLTMANN, *Theorie und Gebrauch des Hydrometerflügels oder zuverlässige Methode, die Geschwindigkeit der Winde und strömenden Wasser zu beobachten* (Hambourg, 1790).

(3) COMBES, *Mémoire sur un nouvel anémomètre* (*Ann. des Mines*, 3^e série, t. XIII, 1838, p. 103).

(4) *Transactions of the Roy. Irish Academy*, XXII, Part III, 1852, p. 155.

(5) *Greenwich Magnetical and meteorological Observations*, 1866; Introduction, p. 48.

(6) Diamètre du moulinet de centre en centre des coupes : 13, 44 inches; diamètre des coupes : 3,75 inches.

(7) STOKES, *Proceedings Roy. Soc.*, XXXII, 1881, p. 170.

viron 2,5 au lieu de 3, et cette valeur est probablement encore trop élevée. Il est d'ailleurs vraisemblable que le facteur $\frac{V}{v}$ n'est pas indépendant de la vitesse du vent, mais décroît à mesure que celle-ci augmente.

A partir de cette époque, les recherches faites au manège se multiplient et il faudrait un volume entier pour les résumer et les discuter. Les plus importants travaux qui en donnent les résultats sont, par ordre d'ancienneté, ceux de :

Dohrandt (Russie) (1873-1874 et 1877-1878) ⁽¹⁾;

Robinson (Iles Britanniques) (1873) ⁽²⁾;

Recknagel (Allemagne) (1878) ⁽³⁾;

Stelling (Russie) (1882) ⁽⁴⁾;

Dines et Whipple (Iles Britanniques) (1888) ⁽⁵⁾;

Dines (Iles Britanniques) (1889-1893) ⁽⁶⁾;

Marvin (États-Unis) (1889-1890) ⁽⁷⁾;

Hasenkamp (Allemagne) (1890) ⁽⁸⁾;

Neumayer (Allemagne) (1897) ⁽⁹⁾;

Certains de ces chercheurs ont opéré sur des manèges installés à l'air libre, soit dans une cour entourée de bâtiments élevés (Marvin), soit dans un jardin (Dines et Whipple); la plupart ont fait leurs expériences en salle close.

La majeure partie des instruments étudiés sont des anémomètres à coupes. Seules les expériences de Dines ont porté sur presque tous les types d'instruments employés pour la mesure de la vitesse du vent.

De ces travaux on peut dégager les conclusions suivantes :

1^o Pour les anémomètres pourvus de moulinets à axe parallèle au vent et munis d'ailettes planes suffisamment petites, la formule de Combes $V = a + bn$ (V , vitesse du vent; a et b , constantes expérimentales; n , nombre de tours du moulinet par unité de temps), dans l'étendue des vitesses expérimentées (0-12^m), suffit pour calculer ces dernières à 1 ou 2 pour 100 près de leur valeur.

2^o Le rapport $\frac{V}{n}$ se montre, pour l'anémomètre hélicoïdal auto-reglable, sensiblement indépendant de la vitesse du vent.

(1) F. DOHRANDT, *Rep. f. Met.*, IV, n^o 3, 1874, et VI, n^o 3, 1878.

(2) ROBINSON, *Philos. Trans.*, vol. 169, p. 777, et vol. 171, p. 1055.

(3) RECKNAGEL, *Wiedemanns Annalen*, IV, 1878, p. 149.

(4) STELLING, *Rep. f. Met.*, IX, *Kleinere Mittheilungen*, n^o 3.

(5) W. H. DINES et G. M. WHIPPLE, *Report of the wind force-committee on experiments with anemometers conducted at Hershham* (*Quart. Journ. Roy. Met. Soc.*, vol. XIV, 1889).

(6) W. H. DINES, *Quart. Journ. Roy. Met. Soc.*, vol. XV, XVI, XVIII, XIX; *Proc. Roy. Soc.*, vol. XLVIII et L.

(7) C. F. MARVIN, *Science*, 1888, 1889; *Amer. Met. Journ.*, V, VI, VII; *Month. Weat. Review*, 1889 et 1890.

(8) H. V. HASENKAMP, *Aus dem Archiv der D. Seew.*, Jahrg. 13, 1890, n^o 3.

(9) NEUMAYER, *Aus dem Archiv der D. Seew.*, Jahrg. 20, n^o 4.

3° Les anémomètres tubulaires munis d'ajutages convenablement disposés constituent d'excellents instruments pour la mesure de la vitesse du vent, une fois connue l'équation reliant leurs indications à cette vitesse.

4° En ce qui concerne les anémomètres Robinson, les vues primitives de l'inventeur doivent être rejetées.

En effet :

a. Le facteur $\frac{V}{v}$ varie dans de larges limites avec les dimensions des divers organes du moulinet.

b. Pour un même instrument, il varie avec la vitesse du vent.

c. D'une manière générale, l'équation empirique qui relie la vitesse linéaire du centre des coupes à la vitesse du vent contient un terme en v^2 et peut se mettre sous la forme

$$V = a + bv + cv^2 \quad (\text{Dohrandt, Marvin}).$$

5° La formule empirique donnée par Dohrandt pour le calcul de la vitesse du vent en fonction de la vitesse de rotation d'un moulinet Robinson et des dimensions de ses organes ne conduit pas à des résultats satisfaisants (Neumayer). •

6° On n'est d'ailleurs pas parfaitement d'accord sur la valeur des mesures faites au manège.

a. La position occupée par l'axe du moulinet par rapport au bras est loin d'être indifférente. Les comparaisons au manège doivent être faites avec l'axe de l'instrument disposé verticalement (Hasenkamp).

b. Quoique l'interprétation rigoureuse des expériences faites au manège sur des anémomètres à axe diversement inclinés soit extrêmement complexe, il est possible d'en induire que des inclinaisons de l'ordre de quelques degrés des filets d'air sur le plan du moulinet n'exercent pas une influence notable sur sa vitesse de rotation (Hasenkamp).

c. L'emploi de la méthode du manège pour la détermination de l'équation d'un anémomètre ne paraît pas être à l'abri de toute critique. Les points faibles du procédé sont la réduction du mouvement circulaire au mouvement rectiligne, l'existence des mouvements parasites dus à l'entraînement de l'air (mitwind) (Hasenkamp, Neumayer) et les perturbations causées par la force centrifuge.

En fait, les résultats obtenus par Cederström ⁽¹⁾ semblent montrer que les expériences faites au manège ne conduisent pas, pour les coefficients de l'équa-

(1) Emil CEDERSTRÖM, *loc. cit.*

tion empirique d'un anémomètre Robinson, aux mêmes valeurs que les déterminations faites en déplaçant l'instrument dans l'air suivant une trajectoire rectiligne. En montant sur un train de chemin de fer un Robinson préalablement étalonné au manège, il a trouvé que les expériences étaient bien représentées par la formule

$$V = 0,62 + 2,618v - 0,041v^2,$$

alors que la méthode du manège avait donné

$$V = 0,32 + 2,209v - 0,074v^2.$$

Les valeurs de V calculées par ces deux formules s'écartent de 4 pour 100 pour $V = 10$ m : sec et l'écart, nul vers 19^m, croît ensuite rapidement en sens inverse pour atteindre 10 pour 100 aux environs de $V = 30$ m : sec.

III. *Recherches théoriques.* — La première explication théorique du fonctionnement des moulinets à axe orienté parallèlement au vent est due à Woltmann ⁽¹⁾ (1790). Combes ⁽²⁾ a donné quarante-huit ans plus tard une théorie de son anémomètre basée sur celle des moulins à vent; il en a déduit la formule linéaire $V = a + bn$ dont l'exactitude a été reconnue par Recknagel.

En ce qui concerne le moulinet à coupes hémisphériques, les travaux théoriques les plus importants auxquels il a donné lieu sont, après ceux de Robinson ⁽³⁾, provoqués par les recherches de Stow et de Dohrandt, ceux de Thiesen ⁽⁴⁾ et de Chree ⁽⁵⁾.

Malgré leur mérite incontestable, le résultat le plus clair de ces travaux a été de montrer que l'étude expérimentale des moulinets anémométriques n'a pas encore été poussée assez loin pour que le mathématicien ait à sa disposition les éléments nécessaires pour résoudre les problèmes que soulève la théorie de leur fonctionnement dynamique.

Les hypothèses que l'on est obligé de faire n'ont pas une base assez solide pour que ces travaux de pure mathématique puissent avoir, dans l'état actuel de nos connaissances, une utilité pratique en rapport avec le travail qu'ils exigent. Par exemple, on ignore encore à l'heure actuelle comment varie la pression exercée par l'air en mouvement sur un hémisphère creux en fonction de la vitesse du courant d'une part et en fonction de l'inclinaison de celui-ci sur le plan diamétral. Les efforts du physicien doivent donc tendre à rassembler les

⁽¹⁾ WOLTMANN, *loc. cit.*

⁽²⁾ COMBES, *loc. cit.*

⁽³⁾ ROBINSON, *On the theory of the cup anemometer and the determination of its constants* (Proc. R. Irish Acad. Sc., vol. II, n° 5, et Phil. Trans., vol. CLXIX et CLXXI).

⁽⁴⁾ M. THIESEN, *Zur Theorie des Robinsonschen Schalen-Anemometer* (Rep. f. Met., Bd V, n° 11)

⁽⁵⁾ C. CHREE, *Contribution to the theory of the Robinson cup-anemometer* (Phil. Mag., 5^e sér., XL, p. 63).

données expérimentales indispensables à l'édification d'une théorie vraiment objective.

Pour les anémomètres tubulaires, leur théorie est intimement liée à celle du tube de Pitot et du tube de Venturi. Elle est résumée dans le *Treatise on Meteorological apparatus and methods* de Cleveland Abbe ⁽¹⁾. G. E. Curtis ⁽²⁾ a consacré un Mémoire spécial à l'étude du tube Venturi et de ses modifications employées pour la mesure du vent et l'on doit à Buky ⁽³⁾ des recherches mathématiques sur les anémomètres système Dines ⁽⁴⁾.

Conclusion. — On voit par cet exposé que si les appareils anémométriques à rotation ont fait l'objet de nombreuses recherches, il reste encore bien des points à élucider concernant leur fonctionnement. En particulier, les divergences constatées entre les résultats des comparaisons faites à l'air libre et de celles effectuées au manège, dont une partie peut s'expliquer par l'inertie des moulinets, attirent l'attention sur l'influence de l'inclinaison du vent sur la vitesse de rotation de ces derniers, influence dont l'étude systématique n'a pas encore été faite jusqu'à ce jour.

La discussion des recherches faites au manège montre d'autre part qu'il n'est pas inutile de tenter l'étalonnage de ces instruments par un procédé dans lequel on ferait mouvoir l'air en ligne droite par rapport aux anémomètres maintenus à poste fixe dans le courant, au lieu de déplacer ces derniers suivant une trajectoire circulaire par rapport à l'air maintenu à l'état de repos.

Enfin la complexité des phénomènes mis en jeu par le fonctionnement des moulinets genre Robinson montre qu'il y aurait avantage à connaître comment varie la pression du vent sur les hémisphères et les hémicylindres creux en fonction de l'inclinaison des filets d'air par rapport à leur plan diamétral.

Je n'insiste pas sur l'intérêt qui s'attacherait à l'étude expérimentale des anémomètres dans des courants de vitesse et de direction rapidement variables. En espérant qu'un jour il sera possible de la réaliser, j'ai essayé d'apporter ma contribution à l'étude des instruments à rotation, en profitant des ressources mises gracieusement à ma disposition par les directeurs des laboratoires aérodynamiques d'Auteuil et de Saint-Cyr.

(1) *Report of the secretary of war*, vol. IV, Part 2 (Washington, 1887).

(2) G. E. CURTIS, *On suction anemometers* (*Am. Met. Journ.*, IV, p. 193).

(3) AUREL V. BUKY, *Mathematische Untersuchung und Verbesserung der Winddruckregistrierapparat System « Dines »* (*Phys. Zeitsch.*, X, 1909, p. 1008-1017).

(4) Une étude expérimentale de diverses formes du tube Pitot et du multiplicateur de Bourdon est donnée par Otto Krell jr, dans un Ouvrage intitulé : *Ueber messung von dynamischen und statischen Druck bewegter Luft* (München und Berlin, 1904).

DEUXIÈME PARTIE.

RECHERCHES PERSONNELLES SUR LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

CHAPITRE I.

MÉTHODES DE MESURE.

Avantages de la méthode employée. — Les divers expérimentateurs, qui ont jusqu'à présent étudié les anémomètres, ont employé des méthodes basées sur le déplacement de ces instruments par rapport à l'air ambiant maintenu sensiblement à l'état de repos.

J'ai employé le procédé inverse. Les moulinets sur lesquels j'ai opéré ont été montés sur un axe dont les frottements étaient réduits au minimum. Cet axe, solidement assujéti sur un support fixe aussi rigide que possible, était placé dans un courant d'air dont la vitesse, réglable à volonté, pouvait être maintenue très sensiblement constante pendant la durée des expériences. Ces courants sont facilement obtenus à l'aide des souffleries utilisées dans les laboratoires aérodynamiques.

Cette manière d'opérer présente, à mon sens, un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, les conditions dans lesquelles se trouve placé le moulinet se rapprochent davantage de celles dans lesquelles il fonctionne lorsqu'il est placé dans l'air libre. Aucune incertitude, provenant de la courbure de la trajectoire moyenne du mouvement de l'air par rapport à l'anémomètre, n'entre en ligne de compte; les perturbations, introduites dans les essais au manège par l'action de la force centrifuge, sont complètement éliminées; les corrections à apporter sont faibles et une détermination incorrecte de leur valeur ne peut causer de graves erreurs. On passe d'ailleurs facilement aux valeurs absolues en mesurant la vitesse du courant d'air à l'aide d'un tube de Pitot.

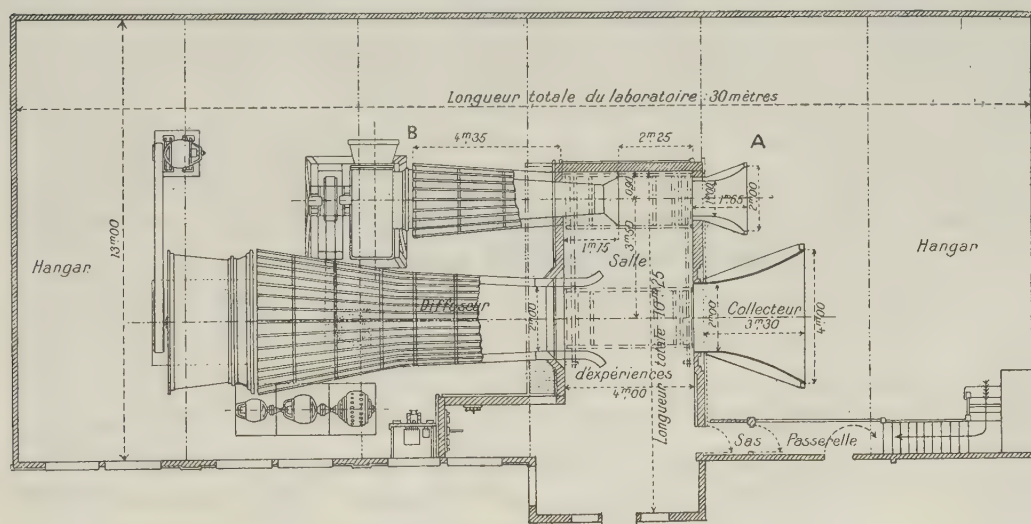
Il faut cependant reconnaître qu'au point de vue de l'anémométrie pratique, cette méthode présente un défaut qui lui est commun avec les méthodes précédemment employées. Les mesures sont faites dans des courants d'air dont la vitesse peut être considérée comme constante en grandeur et en direction pendant la durée d'une expérience : les nombres que l'on trouve ainsi correspondent donc à l'état permanent, et il est certain que, dans un vent de vitesse et de direction variables comme le vent naturel, les choses doivent se passer différemment par suite de l'entrée en jeu de l'inertie de la partie tournante de

l'anémomètre et de l'influence des changements d'inclinaison des filets d'air sur l'horizon. Mais la méthode actuelle présente le grand avantage de permettre de poser le premier jalon grâce auquel nous pourrons un jour arriver à savoir de quelle manière se comportent les anémomètres dans le vent naturel, en nous offrant la possibilité de déterminer, d'une manière précise, comment et dans quelle mesure l'inclinaison des filets d'air, par rapport au plan d'un moulinet anémométrique, affecte la vitesse de rotation de ce dernier.

Description des souffleries système G. Eiffel. — Les courants d'air, dans lesquels mes expériences ont été réalisées, étaient produits par des souffleries du système G. Eiffel, modèle adopté dans la plupart des laboratoires aérodynamiques. J'ai tout d'abord utilisé les deux souffleries du laboratoire de M. Eiffel lui-même à Auteuil, puis celle de plus grand modèle installée à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr. Les résultats trouvés dans les deux laboratoires ne diffèrent guère que de quantités assez faibles, 1 à 2 pour 100 : ces différences sont de l'ordre des erreurs d'expérience et montrent qu'au point de vue mesure des vitesses, les installations, quoique légèrement différentes, sont tout à fait comparables.

Une soufflerie Eiffel comprend quatre parties essentielles : le collecteur, la chambre d'expériences, le diffuseur et le ventilateur. La figure 6 donne la représentation schématique des souffleries du laboratoire d'Auteuil.

Fig. 6.



Souffleries du laboratoire G. Eiffel.

Un ventilateur de grand modèle, actionné par une dynamo, est placé à la partie postérieure de la soufflerie. L'air du hall où est installée celle-ci, aspiré par ce ventilateur, entre par le collecteur dans lequel sa vitesse passe rapidement d'une valeur nulle à une valeur V déterminée par la vitesse de rotation

du ventilateur que l'on règle à volonté en agissant sur le rhéostat de la dynamo qui l'actionne. Il traverse ensuite la chambre d'expériences dans laquelle sa vitesse se maintient sensiblement constante et s'écoule ensuite par le diffuseur. Par suite de la forme évasée qu'affecte ce dernier, le mouvement des filets d'air s'y ralentit progressivement, disposition qui présente l'avantage d'améliorer très notablement le rendement.

Deux grillages en lames de métal mince présentant leur tranche au courant d'air, sont placés, l'un à l'entrée du collecteur, l'autre à sa sortie. Ils ont pour but, le premier de guider les filets d'air, le second de sectionner les tourbillons qui peuvent avoir pris naissance pendant le passage du fluide à travers le collecteur et d'arriver ainsi à une répartition des vitesses sensiblement uniforme dans la section du courant qui traverse la chambre. Celle-ci, close aussi hermétiquement que possible, affecte la forme d'un T dont l'une des deux branches est placée à cheval sur le courant d'air. Cette disposition, très commode pour les expériences, distingue l'installation du laboratoire d'Auteuil de celle de Saint-Cyr, où les parois de la buse sont continues depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Le collecteur s'ouvre dans l'atmosphère par un orifice dont le diamètre est de 4^m. Il débouche dans la chambre par une ouverture circulaire dont le diamètre est égal à 2^m. L'entrée légèrement évasée du diffuseur se trouve placé en face à une distance d'environ 3^m et la longueur totale de la soufflerie est en gros de 19^m. On y réalise couramment, avec un moteur de 60 chevaux, des courants d'air dont la vitesse est comprise entre 2^m et 30^m par seconde. En AB se trouve une buse plus petite où l'on peut atteindre des vitesses de l'ordre de 40 m : sec avec un moteur de même puissance.

La grande soufflerie de Saint-Cyr, dans l'état où elle se trouvait lorsque je l'ai utilisée pour mes expériences, ne diffère que par les dimensions et quelques détails de celle qui vient d'être décrite. Je tiens cependant à les signaler, l'installation ayant subi depuis lors quelques transformations.

Le collecteur de forme conique ne comportait qu'un seul grillage situé à l'entrée de la chambre. Celle-ci est constituée, comme il a été dit plus haut, par un tube cylindrique dont la longueur est de 6^m et le diamètre de 2^m, dans lequel donne accès un trou d'homme fermé pendant les expériences. Pour tenir compte du fait que l'entrée non galbée pouvait apporter quelques perturbations au voisinage de la grille, au lieu d'opérer, comme je l'ai fait au laboratoire de M. Eiffel, à des distances de celle-ci comprises entre 0^m,50 et 1^m, j'ai placé les appareils essayés à Saint-Cyr à des distances comprises entre 2^m et 2^m,50.

Dans la soufflerie de l'Institut aérotechnique, on peut facilement pousser les expériences jusqu'à 43 m : sec., je n'ai pu cependant profiter de cet avantage dans un grand nombre de cas afin d'éviter les dégâts qu'aurait pu produire la rupture des instruments essayés.

Mesure de la vitesse du courant d'air. — Ainsi qu'il ressort de la courte description ci-dessus, le courant d'air est produit par aspiration; c'est donc aux dépens de leur pression que les filets qui le composent acquièrent leur vitesse et, dans les conditions où l'on se trouve placé, le théorème de Bernoulli ⁽¹⁾ est applicable.

En effet, dans la partie du courant utilisée pour les mesures, l'air s'écoule en filets horizontaux et parallèles, et son mouvement est assez régulier pour que l'on puisse regarder l'état permanent comme étant réalisé pendant les expériences. Comme les différences de pression entre l'extérieur et la chambre restent faibles, on peut admettre, conformément au théorème de Bernoulli, que la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle reste constante le long de chacun des filets composant le courant. Dans l'air calme du hall où est placée la buse, l'énergie cinétique est nulle et l'énergie potentielle égale à la pression atmosphérique P . Dans la chambre, où la vitesse est très sensiblement la même dans toute l'étendue d'une section perpendiculaire à la direction du courant, l'énergie cinétique de l'unité de volume est $\frac{\rho V^2}{2}$, en appelant V la vitesse de ce dernier et ρ sa densité. La vitesse V ayant été acquise sans aucun apport d'énergie extérieure on peut écrire, si P_1 est la pression de l'air dans la chambre,

$$(1) \quad P = P_1 + \rho \frac{V^2}{2}.$$

En résolvant par rapport à V , il vient

$$(1 \text{ bis}) \quad V = \sqrt{\frac{2(P - P_1)}{\rho}} \quad \text{en C. G. S.}$$

Il s'ensuit que pour mesurer la vitesse des filets d'air traversant la chambre, il suffira de mesurer la différence entre la pression qui s'établit dans celle-ci, lorsqu'on peut considérer que l'état permanent est atteint, et la pression de l'atmosphère du hall. Cette mesure se fait à l'aide de manomètres à alcool et à tube incliné dont la sensibilité est appropriée aux vitesses que l'on désire réaliser.

Ce procédé présente cependant un léger inconvénient. Les dépressions dans la chambre étant proportionnelles au carré des vitesses, il s'ensuit que l'on est obligé d'employer des manomètres de plus en plus sensibles à mesure que la vitesse devient plus faible. Ainsi, pour mesurer avec une précision de l'ordre de $\frac{1}{100}$ des vitesses de l'ordre du mètre par seconde, il faut disposer de manomètres capables de donner le $\frac{1}{500}$ de millimètre d'eau. Ce n'est qu'à partir de 3 m : sec que les manomètres permettant d'apprécier le $\frac{1}{50}$ sont suffisants,

(1) Voir APPELL, *Traité de Mécanique rationnelle*, t. III, p. 361 et suiv., Paris, Gauthier-Villars, 1900.

et il faut arriver aux vitesses de l'ordre de 10 m : sec pour pouvoir faire usage de manomètres sur lesquels on peut estimer le $\frac{1}{10}$.

Comme les manomètres que nous avons à notre disposition à Saint-Cyr ne permettaient pas, en utilisant le plus sensible, une précision supérieure au $\frac{1}{20}$ de millimètre d'eau, et comme, par suite de la disposition de la chambre d'expériences du laboratoire d'Auteuil, on ne peut garantir la régularité du courant aux très faibles vitesses, nous avons dû nous borner aux vitesses supérieures à 4 m : sec.

Si l'on désire connaître les vitesses du courant d'air à 1 ou 2 pour 100 près de leur valeur, il est d'ailleurs indispensable de s'entourer d'un certain nombre de précautions afin d'éviter l'accumulation des erreurs.

Reportons-nous à la formule (1 bis). $P - P_1$ est mesuré par une certaine hauteur h d'un liquide de densité δ . On a donc $P - P_1 = h\delta g$, g représentant l'intensité de la pesanteur au lieu où sont faites les expériences. En remplaçant $P - P_1$ par sa valeur, on aura

$$(2) \quad V = \sqrt{\frac{2h\delta g}{\rho}}.$$

L'erreur que l'on peut commettre sur h est déjà assez forte et, avec les manomètres couramment employés, peut atteindre pour les vitesses de 5 m : sec environ 3 pour 100. Il faut donc que la somme des erreurs relatives commises sur δ et sur ρ soit au plus de l'ordre de $\frac{1}{100}$ si l'on ne veut pas que celle que l'on commet sur V soit supérieure à 2 pour 100.

La valeur de ρ qu'il faut introduire dans les calculs est celle qui correspond aux conditions qui existent dans la chambre pendant l'expérience. En tenant compte de ce fait, il est facile de connaître ρ à $\frac{1}{300}$ près de sa valeur, en appliquant la formule

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T} \times \frac{H_1 - \frac{3}{8}f}{760}.$$

T peut facilement être connu à 0,5 près. L'erreur sur $H_1 - \frac{3}{8}f$, en tenant compte des dépressions qui se produisent dans la chambre pendant le passage du courant d'air, est dans les cas les plus défavorables de $\frac{1}{300}$; il s'ensuit donc que l'erreur totale sur ρ peut facilement être réduite à 3 pour 1000 (0,003).

Reste l'erreur sur δ . Le liquide employé dans les manomètres est l'alcool. Sa densité est sujette à varier, d'une part avec la température et d'autre part avec le temps, par suite de l'augmentation de la concentration en eau qui accompagne son évaporation. Il est donc nécessaire de s'assurer de la grandeur des variations qu'apportent ces deux causes afin de pouvoir en tenir compte le cas échéant. L'expérience a montré que la densité du liquide employé dans les manomètres que j'ai utilisés varie très sensiblement de 0,005 pour une éléva-

tion de température de 5° entre 10° et 25° . Quant à sa variation en fonction du temps, elle n'atteint une valeur appréciable qu'au bout de plusieurs mois. Donc, en déterminant de temps à autre la densité du liquide manométrique à la balance, et en tenant compte de sa température à 2° ou 3° près, on est en droit d'espérer que l'erreur sur δ ne dépassera pas $\frac{5}{1000}$.

L'erreur totale commise sur l'ensemble des termes placés sous le radical, si l'on a soin de se rappeler que ρ représente la densité de l'air traversant la chambre et doit, par conséquent, être calculée en tenant compte du fait que sa pression est P_1 et non P , sera donc au plus supérieure de 1 pour 100 à celle que l'on commet sur h ; il s'ensuit que, dans les cas les plus défavorables, c'est-à-dire pour les vitesses comprises entre 5^m et 10^m , l'erreur commise sur V pourra être environ 2 pour 100.

Ceci explique pourquoi j'ai cru indispensable de tenir compte de l'humidité de l'air et des variations de densité du liquide manométrique. Les données nécessaires au calcul de ρ ont été mesurées : 1° avec le baromètre Fortin petit modèle Tonnelot n^o 1831, dont j'ai au préalable déterminé la correction en le comparant au Fortin moyen modèle Tonnelot n^o 1617 étalonné au Bureau international des Poids et Mesures; 2° avec un psychromètre du même constructeur dont les thermomètres, reconnus exacts au dixième de degré près, étaient placés dans le hall en un endroit suffisamment ventilé pour donner des indications correctes. Ces deux mêmes instruments, appartenant au Bureau Central météorologique, m'ont servi dans les deux laboratoires.

En ce qui concerne la densité du liquide manométrique, je l'ai mesurée à la balance sur un échantillon prélevé à Saint-Cyr avec l'autorisation de M. Tous-saint. Cet échantillon m'a ensuite servi à déterminer par comparaison la densité du liquide employé à Auteuil.

Voici les nombres que j'ai obtenus :

Liquide manométrique de Saint-Cyr.

Densité à $24^{\circ},6$	0,828
Densité à $10^{\circ},3$	0,842

Liquide manométrique d'Auteuil.

Densité à $17^{\circ},3$	0,839
Densité à $12^{\circ},5$	0,844

En conséquence, j'ai admis, pour simplifier les mesures et les calculs :

	Densité du liquide manométrique.	
	Saint-Cyr.	Auteuil.
Expériences faites entre 10° et 15°	0,840	0,845
» 15° et 20°	0,835	0,840
» 20° et 25°	0,830	0,835

Si l'on examine de près la méthode employée pour la détermination de la pression de l'air dans la chambre d'expériences, on voit de suite que des corrections doivent y être apportées pour pouvoir en déduire la vitesse du courant d'air d'une manière précise.

La pression dans la chambre est déduite de la différence de pression qui s'établit entre l'intérieur de celle-ci et l'atmosphère du hall. Le manomètre qui est employé à mesurer cette différence agit comme manomètre différentiel. L'une de ses branches communique avec l'air calme du hall, l'autre s'ouvre dans une partie de la chambre d'expériences où l'air est à l'état de repos, comme au laboratoire de M. Eiffel, ou bien débouche à l'intérieur et au milieu de la partie cylindrique de la buse par une ouverture dont les bords sont soigneusement arasés, comme c'est le cas à Saint-Cyr. Mais on conçoit que la vitesse prise par les filets d'air doit être légèrement inférieure à celle qui correspondrait, d'après la formule de Bernoulli, à la différence de pression ainsi mesurée. Le choc de l'air sur la tranche des lames métalliques constituant les grilles, son frottement sur leurs parois et sur celles de la buse, se traduisent par une diminution de l'énergie cinétique du courant et l'expérience montre que, pour en tenir compte, il faudrait multiplier les hauteurs lues au manomètre par un facteur constant β légèrement inférieur à l'unité et que l'on peut déterminer en comparant les lectures faites au manomètre donnant la pression dans la chambre d'expériences aux résultats fournis par un second manomètre relié à un tube Pitot placé dans le courant, l'ouverture tournée face au vent.

Les mesures de ce genre, faites au laboratoire de M. Eiffel, ont montré que ce coefficient était très voisin de 0,95 et nous avons admis cette valeur dans nos calculs.

A Saint-Cyr, sur les conseils de M. Toussaint, j'ai procédé moi-même à sa détermination. J'ai ainsi trouvé qu'il fallait multiplier les hauteurs manométriques correspondant à la différence de pression entre le hall et la chambre d'expériences par le facteur 0,97 pour qu'elles concordent avec les indications du manomètre relié à un tube de Pitot, placé dans la partie du courant d'air utilisée pour l'étude des moulinets.

Le Tableau ci-après donne le résultat des mesures. Les indications du manomètre relié au tube de Pitot sont portées dans les colonnes A; les colonnes B contiennent les nombres lus au manomètre donnant la différence de pression entre le hall et l'intérieur de la chambre.

Ces deux instruments avaient été au préalable soigneusement comparés l'un à l'autre, et l'on avait reconnu que leurs indications concordaient, aux erreurs de lecture près, dans toute l'étendue de l'échelle utilisée pour les expériences.

Détermination du coefficient β . Grande soufflerie de Saint-Cyr.

A.	B.	A.	B.	A.	B.
27,0	29,0	68,0	69,0	103,0	106,0
35,5	36,6	69,0	71,5	102,0	106,0
37,0	38,2	69,0	71,5	112,0	116,0
50,0	52,0	82,0	84,3	118,0	121,0
51,0	53,0	91,5	94,0	119,0	122,6
58,0	59,0	93,0	95,4	129,0	133,0

$$\beta = \frac{A}{B} \dots$$

0,965

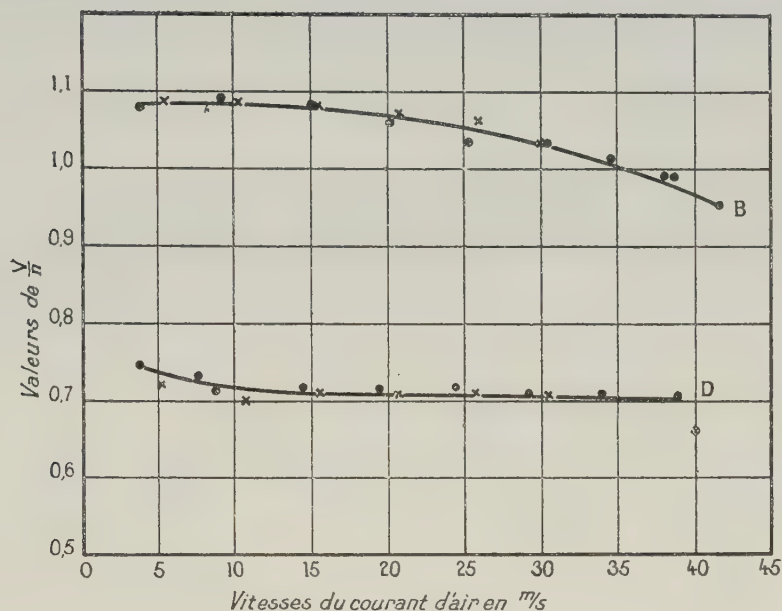
0,973

0,969

On voit que l'on peut admettre, pour le coefficient β dû à la perte de charge, la valeur 0,97 sur laquelle l'incertitude ne paraît pas atteindre plus de $\frac{5}{1000}$.

Concordance des mesures faites dans les deux laboratoires. — De ces considérations il résulte que, en expérimentant dans des laboratoires différents, on devra,

Fig. 7.



Variation du rapport de la vitesse du vent au nombre de tours par seconde.

Moulinet Richard (B) et moulinet D.

• Laboratoire G. Eiffel × Institut aérotechnique.

si l'on s'entoure des quelques précautions énumérées au cours de la discussion précédente, trouver des résultats tout à fait comparables et que la précision des nombres obtenus dépendra, en majeure partie, de celle avec laquelle seront faites les mesures manométriques.

L'expérience vérifie pleinement cette conclusion. Deux moulinets ont été étudiés comparativement dans le courant d'air du laboratoire de M. Eiffel et

dans celui de la grande soufflerie de Saint-Cyr; l'un était un moulinet Richard normal (moulinet B), l'autre, un moulinet spécial de dimensions plus petites à ailettes entoilées que j'ai désigné par la lettre D et qui sera décrit plus bas. Les mesures faites dans les deux laboratoires sont représentées dans le graphique de la figure 7 dans laquelle les abscisses représentent les vitesses du courant d'air V , et les ordonnées le rapport $\frac{V}{n}$ des vitesses exprimées en mètres par seconde aux vitesses de rotation correspondantes du moulinet mesurées en tours par seconde. Les croix se rapportent aux nombres obtenus au laboratoire d'Auteuil, les points à ceux obtenus à Saint-Cyr. On voit que les écarts entre les essais restent compris dans les limites que la discussion précédente nous a permis de fixer et que, de plus, ils sont du même ordre de grandeur que ceux que l'on observerait entre deux séries d'essais faits dans un même laboratoire.

Dispositif employé pour l'étude des moulinets. — Les différents auteurs, qui ont expérimenté sur les instruments de mesure employés en anémométrie, ont effectué leurs recherches sur des appareils complets tels qu'ils sont utilisés dans la pratique. Ce procédé a l'avantage de fournir des résultats directement utilisables, mais il ne permet pas de séparer les diverses influences sous lesquelles se modifie le fonctionnement à mesure que la vitesse du vent augmente. Il semble en effet légitime d'admettre que les remous, causés par la boîte renfermant les divers rouages du compteur de tours ou du mécanisme servant à transmettre à distance les indications de l'anémomètre, interviennent pour une certaine part dans les modifications que subit le rapport de la vitesse de rotation du moulinet à la vitesse du courant d'air. L'importance de ces remous est d'ailleurs sujette à varier avec la forme et les dimensions de la boîte et leur répercussion sur le mouvement du moulinet sera fonction de la position qu'occupe cet organe par rapport au mécanisme. D'autre part, les frottements inévitables dans ce dernier et d'autant plus à craindre qu'il est plus compliqué, ne sont pas les mêmes lorsqu'on passe d'un instrument à un autre, de sorte qu'il devient difficile, si l'on compare entre eux des anémomètres différents, de déterminer les causes auxquelles les variations obtenues dans le fonctionnement doivent être attribuées.

Ces considérations m'ont conduit à penser qu'il serait plus instructif d'opérer avec des moulinets interchangeables, qui seraient montés à tour de rôle sur un même compteur de tours n'apportant que des modifications assez faibles dans la direction des filets d'air et dont les frottements seraient aussi réduits que possible.

Dans ce but, j'ai fait construire par le mécanicien du Bureau Central météorologique le dispositif suivant :

Une tige d'acier de 26^{cm} de longueur a été travaillée au tour de manière à la

transformer en un cylindre de 6^{mm} de diamètre aussi parfait que possible. A l'un des bouts, on a creusé une cavité dans laquelle a été enchâssée à chaud une bille d'acier trempé dont le diamètre était à peine supérieur à celui de cette cavité. L'extrémité opposée a été tournée en cône de telle façon que les noyaux de moulinet Richard puissent s'y adapter exactement, et son extrémité a été filetée sur une longueur suffisante pour pouvoir y visser l'écrou de serrage du noyau et son contre-écrou.

L'axe ainsi constitué, après avoir été soigneusement poli, a été muni au $\frac{1}{5}$ de sa longueur à partir de la bille, d'un manchon de 2^{cm},5 de long portant une vis sans fin de 1^{mm} de pas.

Afin que cet axe pût tourner avec le moindre frottement possible, il était indispensable d'employer des coussinets à billes. J'avais d'abord pensé que ceux que l'on trouve couramment dans le commerce seraient suffisants. Mais j'ai dû renoncer à les utiliser; le jeu des billes étant beaucoup trop grand par rapport au diamètre du roulement. Je me suis donc vu dans l'obligation d'en faire réaliser à l'atelier du Bureau Central météorologique, où nous avons obtenu deux excellents coussinets qui se sont parfaitement comportés pendant toute la durée des expériences, en réduisant le jeu total du roulement à $\frac{1}{10}$ de millimètre environ.

Ces coussinets ont été fixés dans un tube en laiton de 20^{mm} de diamètre extérieur et de 1^{mm} d'épaisseur. Pour éviter les déplacements longitudinaux, l'extrémité de l'axe terminée par une bille d'acier repose sur un plan d'acier trempé et la partie opposée est munie d'une butée à bille de telle manière que le jeu longitudinal est réduit à une faible fraction de millimètre et qu'aucun coincement n'est à redouter.

Une roue dentée, actionnée par l'intermédiaire de la vis sans fin, est disposée pour fermer le circuit d'une pile dans lequel est placé un électro-aimant, chaque fois qu'elle a accompli une révolution. Le nombre des dents étant de 50, il suffit de multiplier cette constante par le nombre de fois que l'électro-aimant a attiré son armature pour connaître le nombre de tours faits par l'axe. Ce nombre, divisé par le temps correspondant, fournit la vitesse de rotation exprimée en tours par seconde. Le temps est facilement mesuré à l'aide d'un bon chronomètre; celui qui m'a servi dans mes expériences est un chronomètre Darras du modèle en usage dans les laboratoires de physique et appartenant au Bureau Central météorologique.

Tout le mécanisme est enfermé dans une petite boîte métallique plate soudée au tube extérieur en face d'une ouverture pratiquée dans ce dernier. Son volume total est d'environ 360^{cm}³; elle est placée à 17^{cm} des bras du moulinet et disposée de manière à compenser la diminution dans la résistance à la flexion du tube provoquée par l'ouverture pratiquée dans ses parois.

L'appareil ainsi constitué a fonctionné à mon entière satisfaction, pendant toute la durée des recherches. Pour mettre en mouvement le plus lourd des moulinets employés (moulinet J : poids, 435g; longueur des bras depuis l'axe jusqu'au centre des coupes, 212^{mm},5), il suffisait de placer dans l'une des coupes un poids de 0g,050.

Pour étudier, d'une manière commode et suffisamment précise, l'influence de l'orientation du moulinet par rapport aux filets d'air sur sa vitesse de rotation, il est indispensable de pouvoir déterminer facilement l'angle formé par la direction de ces derniers avec le plan du moulinet. Dans ce but, le dispositif décrit plus haut a été complété de la manière suivante :

J'ai fait tourner un tambour en fer de 4^{cm},9 de diamètre dont la circonférence a été divisée en 72 parties égales, et j'ai fixé à l'une de ses extrémités un collier, formé de deux pièces réunies par des boulons, dans lequel vient s'adapter le dispositif décrit ci-dessus. L'extrémité opposée est formée d'une tige cylindrique faisant corps avec le tambour et filetée sur la moitié de sa longueur. Cette tige est mobile à frottement doux dans un trou circulaire percé dans une pièce de fer plat munie d'un repère. Un écrou permet de rendre à volonté le tambour solidaire de cette pièce qui est fixée elle-même sur un support rigide.

Pour n'avoir pas à tenir compte des variations du frottement dues aux variations des composantes du poids de l'ensemble formé par le moulinet et son axe, et dirigées respectivement suivant cet axe et perpendiculairement à sa direction, il m'a paru préférable d'opérer dans un plan horizontal. Grâce au fait que les filets d'air composant le courant fourni par la soufflerie sont eux-mêmes horizontaux, cette manière de faire ne présente aucune difficulté. La figure ci-contre montre l'ensemble du dispositif tel que je l'ai utilisé au laboratoire d'Auteuil.

Le réglage se fait d'une manière très simple.

On commence par fixer la position du support de manière qu'au cours d'une rotation complète du tambour l'axe portant le moulinet reste dans un plan horizontal. Puis on note la graduation du tambour correspondant au repère dans la position où cet axe est parallèle à la grille et par conséquent perpendiculaire aux filets d'air. Il est ensuite facile, en utilisant la graduation, d'amener à un degré près le plan du moulinet à faire avec les filets d'air tel angle que l'on désire et de bloquer l'ensemble dans la position choisie à l'aide de l'écrou de serrage.

Pour me rendre compte des modifications qui s'introduisent dans le fonctionnement d'un anémomètre construit pour fonctionner avec son axe placé verticalement, lorsqu'on dispose ce dernier horizontalement, j'ai déterminé, pour des courants d'air de même vitesse, les vitesses de rotation d'un même anémomètre Robinson muni d'un axe tournant entre des coussinets ordinaires. Le poids du moulinet étant de 846g, on pouvait s'attendre à trouver d'assez

fortes différences dans le fonctionnement dans les deux positions. En fait, l'expérience a montré que les vitesses de rotation étaient les mêmes, aux erreurs expérimentales près, pour les vitesses du courant d'air supérieures à 7 m : sec et que la différence ne dépassait notablement 2 pour 100 qu'au-dessous de 6 m : sec; à la vitesse de 5 m : sec, elle est de 5 pour 100 et croît ensuite très rapidement à mesure que la vitesse du vent décroît pour atteindre environ 10 pour 100 à 4 m : sec, le moulinet tournant moins vite lorsque son axe est placé horizontalement.

Fig. 8.



Installation du dispositif pour l'étude des moulinets anémométriques dans la grande buse du laboratoire G. Eiffel.

Avec l'axe spécial décrit plus haut, l'expérience m'a montré que pour les vitesses de l'ordre de 4 à 5 m : sec, les différences des vitesses de rotation dans les deux positions étaient au plus de l'ordre des erreurs d'expérience et qu'elles pouvaient être négligées pour toutes les vitesses supérieures à 5 m : sec.

Conduite d'une expérience. — Le moulinet étant installé dans la position choisie pour effectuer les mesures, on lit le baromètre et le psychromètre et l'on modifie progressivement la vitesse du ventilateur jusqu'à ce que la dénivellation lue au manomètre atteigne la valeur correspondant à la vitesse désirée pour le courant d'air. On attend ensuite quelques instants que le régime permanent soit atteint, ce qui est indiqué par la stabilité de l'extrémité de la colonne manométrique. On procède alors aux mesures simultanées de la vitesse du courant d'air d'une part, de la vitesse de rotation du moulinet d'autre part. On saisit le moment où l'électro-aimant, commandé par la roue dentée actionnée par l'axe du moulinet, attire son armature pour mettre en marche le chro-

nomètre et donner un top à l'aide qui lit l'indication du manomètre. On compte alors un nombre rond d'attractions de l'armature réparties sur une durée comprise entre 1 ou 2 minutes pendant que l'aide lit le manomètre à des intervalles de temps égaux compris entre 20 et 30 secondes.

Le nombre de contacts, multiplié par 50, donne le nombre de tours effectués par le moulinet; la vitesse du courant d'air se déduit de la moyenne des indications du manomètre pendant le même temps.

On peut remplacer la moyenne des lectures faites au manomètre à intervalles égaux par la hauteur autour de laquelle a oscillé la colonne pendant les mesures. L'expérience m'a montré que les résultats obtenus ne différaient pas sensiblement de ceux que fournit la première méthode.

Le premier procédé présente cependant un léger avantage: c'est de permettre, si on le désire, d'obtenir une valeur plus approchée de la vitesse du courant d'air en calculant séparément les vitesses correspondant à chaque lecture manométrique et en en prenant ensuite la moyenne, mais les oscillations de la colonne manométrique sont d'ordre assez faible pour qu'il soit inutile de recourir à ce procédé qui aurait le gros inconvénient de rendre les calculs beaucoup plus compliqués.

Le temps nécessaire pour réaliser une série de mesures en vue de déterminer la variation de la vitesse de rotation d'un moulinet en fonction de la vitesse du courant d'air est de 20 minutes environ; les variations subies par la température, la pression et l'humidité de l'air pendant cet intervalle se sont toujours montrées assez faibles pour qu'il fût légitime d'admettre que ces éléments étaient restés invariables pendant toute la durée de l'opération. En fait, j'ai donc toujours pu me servir, pour les calculs, de la moyenne de leurs valeurs déterminées au début et à la fin des expériences et, bien souvent, j'ai pu faire plusieurs séries de mesures sans avoir à tenir compte des variations de la densité de l'air résultant des changements de pression, de température ou d'humidité.

Calcul des vitesses du courant d'air. — Dans mes premières expériences, l'expérimentateur chargé de manœuvrer le rhéostat de la dynamo qui commande le ventilateur s'arrangeait de manière à me donner toujours, dans les diverses expériences faites au cours d'une même séance, des vitesses égales du courant d'air en modifiant convenablement la résistance du rhéostat. Cette manière de faire simplifie notablement les calculs quand la température, la pression et l'humidité de l'air restent sensiblement constants pendant le temps que dure la séance. Dans le cas où ces éléments changent d'une expérience à l'autre, il est aussi simple de mesurer les quantités nécessaires au calcul de la vitesse du vent et de faire ensuite les calculs en série. C'est ce dernier procédé que j'ai employé dans la plupart des cas.

Nous avons vu que V (vitesse du courant d'air) est donnée par la formule

$$V = \sqrt{\frac{2gh\delta\beta}{\rho}}.$$

Comme, d'autre part,

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T} \times \frac{H_1 - \frac{3}{8}f}{760},$$

les éléments nécessaires au calcul de V sont :

h , indication du manomètre;

δ , densité du liquide manométrique à la température de l'expérience;

β , coefficient dû à la perte de charge;

H , pression atmosphérique;

f , tension de la vapeur d'eau;

T , température absolue du courant d'air.

Le produit $h\delta$, multiplié par un facteur dépendant de l'inclinaison du tube du manomètre, donne un nombre h_1 représentant la dépression dans la chambre mesurée en millimètres d'eau. Ce nombre h_1 , divisé par la densité du mercure, fournit la correction h'_1 qu'il faut appliquer à H pour obtenir la pression réelle H_1 dans la chambre.

Pour calculer ρ , on retranche de H : 1^o la quantité $\frac{3}{8}f$; 2^o h'_1 . Le nombre H_1 ainsi trouvé, multiplié par le produit $\rho_0 \frac{273}{T \times 760}$, fournit les valeurs de ρ . Les calculs se font facilement en série à la machine à calculer, grâce au fait que le produit $\rho_0 \times \frac{273}{T \times 760}$ peut être considéré comme constant pendant une série de mesures assez longue.

Il est ensuite commode de calculer par logarithmes les valeurs de V en se servant de la formule

$$V = \sqrt{\frac{2g\beta \times h_1}{\rho}},$$

dans laquelle g est exprimé en mètres par seconde, h_1 en millimètres d'eau et ρ en kilogrammes par mètre cube.

Les nombres ainsi obtenus sont, aux erreurs d'expérience près, les vitesses réelles du courant d'air; elles sont exprimées en mètres par seconde. Quoique la discussion reproduite ci-dessus nous ait montré qu'elles peuvent être affectées d'une erreur relative comprise entre 1 et 2 pour 100, j'ai cru devoir les donner avec deux décimales. Mais je les ai arrondies en tenant compte de cette erreur pour faire l'étude des rapports entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation des moulinets.

CHAPITRE II.

PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT ET DESCRIPTION DES MOULINETS ÉTUDIÉS.

Nous avons vu que les divers moulinets dont l'emploi a été proposé pour la mesure de la vitesse du vent peuvent être divisés en deux grandes classes d'après l'orientation de leur axe par rapport à la direction des filets d'airs lorsqu'ils se trouvent placés dans les conditions de fonctionnement normal.

Dans la première se rangent les moulinets dont les ailettes sont disposées comme les ailes d'un moulin à vent et dont l'axe est dirigé parallèlement au vent.

À la seconde, appartiennent ceux dont l'axe est orienté perpendiculairement à la direction du courant dont ils sont destinés à mesurer les vitesses.

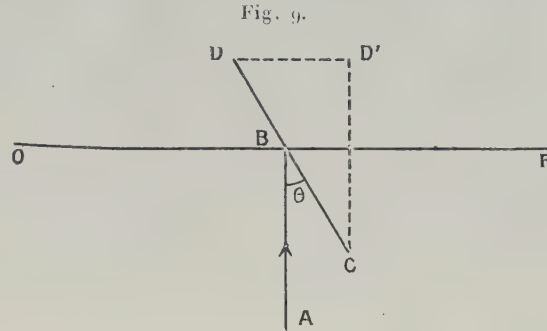
Avant d'aborder l'étude de ces organes, il est utile de se rendre compte des principes sur lesquels est basé leur fonctionnement et des causes qui peuvent intervenir pour le faire varier. Quoique le problème complet se présente sous des apparences très complexes, et qu'en réalité il soit, dans l'état actuel de nos connaissances, pratiquement insoluble dans le cas des moulinets appartenant à la deuxième classe, les tentatives, mêmes infructueuses faites en vue de le résoudre, ont toujours leur utilité en précisant les points sur lesquels doit se porter spécialement l'attention du chercheur. Je tâcherai donc tout d'abord d'exposer, brièvement et aussi simplement que possible, les quelques considérations sur lesquelles on peut s'appuyer pour tenter de mettre en évidence les causes qui interviennent pour produire et modifier les phénomènes de rotation observés.

Principe du fonctionnement des moulinets à axe parallèle au vent. — Supposons qu'une feuille plane, faite d'une matière rigide ayant la même densité que l'air, soit placée dans le vent et assujettie à se déplacer le long d'un fil tendu perpendiculairement à la direction du courant (*fig. 9*).

Soient OF la direction du fil, AB celle du vent, CD la projection de la feuille considérée sur le plan passant par la direction du fil et par celle du vent. Si aucun frottement n'intervient, CD se déplacera de O vers F et, lorsque l'état permanent sera établi, sa vitesse de déplacement sera proportionnelle à la vitesse du vent et à la tangente de l'angle formé par les directions CD et AB.

Si v est la vitesse de CD sur OF et V la vitesse du vent, on devra avoir entre ces deux quantités et θ la relation $v = V \tan \theta$. En effet, si nous supposons

que la surface CD, primitivement placée dans l'air calme, soit brusquement soumise à l'action d'un courant d'air de vitesse V , elle subira sur la face exposée au vent une certaine pression qui tendra à la déplacer vers F. A mesure que son mouvement le long de OF s'accélérera, elle sera l'objet sur la face opposée



d'une pression croissant avec sa vitesse et l'état permanent ne sera atteint que lorsque les réactions de l'air sur ses deux faces s'équilibreront, c'est-à-dire quand le mouvement des filets d'air relativement à la surface sera dirigé parallèlement à CD. Il faut donc qu'à ce moment la résultante des vitesses du plan, v , et du vent, V , fasse avec la direction de ce dernier l'angle θ . Autrement dit, il faut que, pendant le temps t que met une molécule d'air à aller de C en D', le point D ait passé de D en D'.

Or

$$DD' = vt, \quad CD' = Vt$$

et, d'autre part,

$$DD' = CD \sin \theta, \quad CD' = CD \cos \theta;$$

donc

$$\frac{CD \sin \theta}{CD \cos \theta} = \frac{vt}{Vt} \quad \text{et} \quad v = V \tan \theta.$$

Supposons maintenant qu'au lieu de se déplacer parallèlement à elle-même le long d'un fil tendu, la surface que nous avons considérée et que nous supposons très petite, soit assujettie à tourner sans frottement autour d'un axe parallèle aux filets d'air. Quand l'état permanent sera établi, la relation ci-dessus sera toujours valable; si ω est sa vitesse angulaire, r sa distance à l'axe, on aura :

$$v = r\omega \quad \text{et} \quad \omega = \frac{V \tan \theta}{r}.$$

Cette équation définit la condition à laquelle doivent satisfaire tous les points de la surface d'une ailette de moulinet à axe parallèle au vent pour que les actions que ce dernier exerce sur elle soient toutes concordantes. Elle détermine une certaine surface dont il est facile de préciser la forme.

Tous les points situés à la même distance de l'axe doivent avoir la même

vitesse angulaire. Il s'ensuit que, pour tous ces points, on doit avoir

$$\text{tang } \theta = \text{const.} \quad \text{ou} \quad \theta = \text{const.}$$

Considérons une série de filets d'air très voisins parallèles entre eux et situés à la même distance de l'axe du moulinet. Ces filets forment les génératrices d'un cylindre de rayon r , et la condition $\theta = \text{const.}$ indique que la surface de l'ailette coupe ce cylindre suivant une courbe faisant avec les génératrices successives un angle constant. Cette courbe est donc une hélice.

Soit h le pas de cette hélice; en développant une spire complète sur un plan, on obtient un triangle rectangle dont l'un des côtés de l'angle droit est h et l'autre $2\pi r$; l'angle θ est relié à h et à r par l'équation

$$\text{tang } \theta = \frac{2\pi r}{h}.$$

Or la relation à laquelle doivent satisfaire tous les points de la surface de l'ailette est

$$\frac{V \text{ tang } \theta}{r} = \omega;$$

il en résulte que

$$h = 2\pi \frac{V}{\omega}.$$

Comme ω doit être le même pour tous les points de la surface, $2\pi \frac{V}{\omega}$ doit être constant et $h = \text{const.}$

Le pas des hélices obtenues en coupant la surface de l'ailette par des cylindres dont l'axe coïncide avec l'axe de rotation est indépendant du rayon de ces cylindres; il s'ensuit que la surface cherchée est un hélicoïde à pas constant.

Le rapport de la vitesse du vent à la vitesse de rotation du moulinet est indépendant des dimensions du moulinet; il est uniquement fonction, si l'on admet que les frottements sont négligeables, du pas de l'hélicoïde et de la précision avec laquelle ce dernier peut être réalisé.

Cherchons, à titre d'application, quel devra être le pas des ailettes d'un moulinet tournant sans frottement autour de son axe et effectuant par seconde un nombre de tours représenté par le même nombre que la vitesse du vent exprimée en mètres par seconde. Soient n le nombre de tours, V la vitesse du vent; on veut avoir $\frac{V}{n} = 1$. D'autre part, $\omega = 2\pi n$; comme $h = \frac{2\pi V}{\omega} = \frac{2\pi V}{2\pi n}$, il en résulte que $h = 1^{\text{m}}$.

Le pas une fois fixé, l'angle que fait la tangente à l'ailette avec une droite parallèle à l'axe de rotation et située à une distance r de cet axe est déterminé par l'équation

$$\text{tang } \theta = \frac{2\pi r}{h}.$$

Cherchons à quelle distance de l'axe $\theta = 45^\circ$ lorsque $h = 1^m$. Nous avons, puisque $\tan 45^\circ = 1$,

$$r = \frac{1}{2\pi} = 0^m,1592.$$

On calculerait de la même manière que, pour que $\frac{V}{n} = \frac{2}{3}$, il faut que

$$h = 0,6667 \quad \text{et} \quad r_{\theta=45^\circ} = \frac{0,6667}{2\pi} = 0^m,1061;$$

pour que $\frac{V}{n} = 2$,

$$h = 0^m,50 \quad \text{et} \quad r_{\theta=45^\circ} = \frac{0,500}{2\pi} = 0^m,0796.$$

Quoique ces considérations soient purement théoriques, puisque nous avons fait abstraction du frottement, elles constituent cependant une première approximation qui va nous permettre de nous rendre compte de l'influence de l'inclinaison des ailettes et de leur distance à l'axe sur le rapport de la vitesse du vent à la vitesse de rotation des moulinets à ailettes planes.

Soit un moulinet de cette espèce dont les ailettes font un angle θ avec les filets d'air du courant dans lequel on le place. Si V est la vitesse de ce courant, le moulinet prend une vitesse de rotation ω , et pour un certain point, pris sur une ligne perpendiculaire à l'axe et à une certaine distance r de celui-ci, la condition $\frac{V \tan \theta}{r_1} = \omega$ est remplie.

Pour tous les autres points situés sur la même ligne radiale, cette condition n'est pas satisfaite, et comme leur distance à l'axe est plus grande ou plus petite que r_1 , la vitesse de rotation est supérieure ou inférieure à ce qu'elle devrait être pour satisfaire à l'équation $V \tan \theta = \omega r$.

Si les dimensions des ailettes sont suffisamment petites, on pourra admettre, sans erreur sensible, que la longueur r_1 est égale à la distance qui sépare leur centre de figure de l'axe de rotation. Il devient alors facile de calculer la longueur qu'il faut donner aux bras pour que le nombre de tours du moulinet, par unité de temps, soit dans un rapport donné x avec la vitesse du vent, en supposant que les frottements soient négligeables.

On a en effet :

$$\frac{V}{\omega} = \frac{V}{2\pi n} = \frac{r_1}{\tan \theta}.$$

Si l'on pose $\frac{V}{n} = x$, on a :

$$r_1 = \frac{x \tan \theta}{2\pi}.$$

La longueur des bras, comptée depuis l'axe jusqu'au milieu des ailettes, est donc déterminée par x et θ . Pour une valeur donnée de x , r_1 sera d'autant plus

grand que θ (angle du plan des ailettes avec l'axe de rotation) se rapprochera davantage de 90° .

En ce qui concerne θ , les expériences sur la résistance des plaques montrent que son choix n'est pas indifférent. Si l'on veut réaliser le maximum de sensibilité, il y a intérêt à choisir l'inclinaison pour laquelle la pression du vent est maxima. Pour des ailettes carrées, par exemple, l'inclinaison optima sera de 38° (52° par rapport au plan des bras) si l'on est en droit d'étendre à des plaques dont la surface est de l'ordre du centimètre carré, les résultats obtenus en expérimentant avec des plaques de 25cm de côté ⁽¹⁾. Si, au contraire, on désire avoir un moulinet qui, une fois mis en rotation, s'arrête le plus rapidement possible, il faudra choisir pour θ la valeur 52° (38° par rapport au plan des bras).

En s'appuyant sur ces considérations élémentaires dans lesquelles nous avons fait abstraction de tous les phénomènes parasites qui interviennent pour modifier le mouvement de rotation du moulinet, on peut arriver à construire, à condition que les frottements axiaux soient suffisamment faibles, des anémomètres à axe parallèle au vent pour lesquels le rapport $\frac{V}{n}$ reste sensiblement constant et possède, à 5 ou 6 pour 100 près, la valeur choisie à l'avance.

Principe du fonctionnement des moulinets à axe perpendiculaire au vent. — Il n'en est pas de même en ce qui concerne les moulinets de la deuxième catégorie. Leur fonctionnement est beaucoup plus complexe et il est difficile de s'en faire *a priori* une idée exacte. Si l'on peut admettre en effet, à titre de première approximation, que les déformations que fait subir aux filets d'air un moulinet à axe parallèle sont négligeables, il ne semble pas qu'il en soit ainsi dans le cas des moulinets genre Robinson.

La coupe qui présente sa convexité au vent se déplace par rapport au courant avec une vitesse bien supérieure à la vitesse de ce dernier et l'on sait que les corps sphériques, placés dans des courants d'air de vitesse suffisante, font subir aux filets des déviations considérables. Le coefficient de résistance d'un hémisphère creux exposé au vent n'est d'ailleurs pas constant, mais varie avec la vitesse; de plus, il est certainement fonction de l'incidence des filets d'air sur son plan diamétral. D'autre part, il ne faut pas oublier que les coupes se déplacent dans le vent en tournant autour d'un axe. Si leur diamètre est grand par rapport à la longueur des bras, la vitesse relative des éléments les plus rapprochés de cet axe n'est pas la même que celle des parties situées à la périphérie. Il s'ensuit que les hémisphères ne peuvent plus être considérés comme se

(1) G. EIFFEL, *La résistance de l'air et l'aviation* (*Aérophile*, 15 juin 1911, p. 267-287).

déplaçant dans un courant dont tous les filets sont animés de la même vitesse.

Ces quelques considérations suffisent pour mettre en évidence les difficultés que soulève l'explication des mouvements de rotation que l'on constate.

L'expérience montre que la résistance offerte par un hémisphère creux à l'air en mouvement est beaucoup plus grande quand il présente au vent sa face concave que quand il est placé dans la position inverse. Robinson avait trouvé, que dans le premier cas, la résistance était quatre fois plus grande que dans le second. Plus récemment, G. Eiffel ⁽¹⁾ en expérimentant sur un hémisphère de 25^{cm} de diamètre a trouvé pour ce rapport la valeur 3,95. En étudiant à Saint-Cyr la résistance d'un hémisphère creux ayant comme diamètre intérieur 131^{mm} et comme diamètre extérieur 133^{mm}, j'ai trouvé, en opérant à la vitesse de 20 m : sec, 3,83 ⁽²⁾.

C'est sur ce fait expérimental que repose l'explication du sens de la rotation que prennent les moulinets à coupes hémisphériques placés dans un courant d'air.

Si l'on considère une tige mobile autour d'un axe passant par son centre et munie à ses extrémités de deux coupes hémisphériques disposées de telle sorte que l'une présente sa concavité au vent, tandis que l'autre lui présente sa convexité, l'effort subi par la coupe concave étant quatre fois plus considérable que celui que supporte la coupe convexe, le système se mettra en rotation de manière que les hémisphères tournent leur convexité dans le sens du mouvement.

En fait, les phénomènes ne sont pas aussi simples que l'on serait tenté de le croire. Ce n'est que grâce au moment d'inertie de l'ensemble que l'on obtient, tout au moins pour les vents de l'ordre de 5 m : sec, un mouvement de rotation continu. J'ai montré en effet ⁽³⁾ qu'un système de deux coupes disposées comme il a été dit ci-dessus, placé dans le vent, passe au cours d'une rotation complète par quatre positions d'équilibre, deux stables et deux instables. En se déplaçant sur la circonférence du moulinet dans le sens de sa rotation et en partant d'une position d'équilibre stable, on les rencontre dans l'ordre suivant :

- Première position d'équilibre instable (arc parcouru : env. 30°);
- Deuxième position d'équilibre stable (arc parcouru : 180°);
- Deuxième position d'équilibre instable (arc parcouru : env. 210°);
- Première position d'équilibre stable (arc parcouru : 360°).

Pendant le passage, dans le sens de la rotation, d'une position d'équilibre instable à la position d'équilibre stable qui la suit, le couple dû à l'action du

(1) G. EIFFEL, *La résistance de l'air et l'aviation*, Paris, 1910, p. 76.

(2) Voir troisième Partie, Chapitre III.

(3) *Comptes rendus*, t. 170, 1920, p. 610.

vent est moteur, il est au contraire résistant pendant le passage de la position d'équilibre stable à la position d'équilibre instable suivante. Il en résulte que, pendant une révolution complète, le système doit franchir deux angles de 30° environ pendant lesquels le vent tend à lui communiquer un mouvement de sens opposé à celui qu'il possède pendant le reste de la révolution. Ces deux angles morts ne peuvent être franchis que grâce à l'énergie emmagasinée pendant la partie de la rotation où le couple est moteur. Si le moment d'inertie de l'ensemble formé par les deux couples et les bras qui les portent était suffisamment réduit, on ne constaterait pas de mouvement de rotation continu pour les faibles vitesses. Aux vitesses élevées, les déformations créées dans le courant par les organes du moulinet pourraient peut-être amener la continuité du mouvement de rotation; mais, comme le montre l'étude des variations subies par la résistance des hémisphères creux placés dans l'air en mouvement ⁽¹⁾, la vitesse linéaire des coupes serait très variable pendant le cours d'une révolution. On ne peut obvier à cet inconvénient qu'en multipliant le nombre de celles-ci ou en augmentant le moment d'inertie du système.

Dans la pratique, on adopte un moyen terme en faisant des moulinets comportant quatre hémisphères placés à 90° les uns des autres.

Quand un tel moulinet est placé dans un courant d'air de vitesse invariable, il prend rapidement un mouvement de rotation continu, et chaque fois que l'on recommence l'expérience, on trouve qu'à la même vitesse du courant V correspond la même vitesse moyenne de rotation n , exprimée en tours par seconde. Dans ces expériences où l'état permanent est sensiblement réalisé, le travail accompli par les forces motrices pendant une révolution complète est égal à celui que fournissent les forces résistantes pendant le même intervalle, mais rien n'indique que le rapport $\frac{V}{n}$ doive être indépendant de V . Si la loi, suivant laquelle varie la résistance des hémisphères en fonction de la vitesse du vent, n'est pas la même suivant qu'ils présentent aux filets d'air leur concavité ou leur convexité, on devra plutôt s'attendre, même dans le cas idéal où le frottement de l'axe sur ses coussinets serait nul, à trouver des variations dans la valeur de ce rapport à mesure que change la vitesse du courant.

D'autre part, on peut prévoir *a priori* que si l'on place dans un courant de vitesse V deux moulinets Robinson de diamètre D et D' (mesurés de centre en centre des coupes) et construits avec des hémisphères de diamètres d et d' , on a peu de chances que la condition $\frac{D}{D'} = \frac{n'}{n}$ soit réalisée d'une manière rigoureuse. Les changements apportés aux dimensions des divers organes entraînent en effet des modifications dans les actions qu'exercent les

(1) Voir troisième Partie, Chapitre II.

coupes les unes sur les autres et dans la répartition des vitesses relatives sur la surface de ces dernières ⁽¹⁾, modifications qui doivent nécessairement avoir leur répercussion sur la vitesse de rotation de l'ensemble. Mais il est plus difficile de préciser le sens et la grandeur des variations que subit la fonction $\frac{V}{n} = f(V)$ quand on vient à changer D et d .

La formule empirique que Dohrandt ⁽²⁾ avait déduite de ses expériences pour calculer les constantes d'un Robinson, d'après les dimensions des bras et des coupes, a été reconnue insuffisante par Neumayer ⁽³⁾ et il ne semble pas que l'on possède actuellement le moyen de faire un anémomètre à coupes répondant à des conditions connues autrement qu'en copiant un modèle préalablement étalonné; encore faut-il s'attendre dans ces conditions, d'après ce dernier auteur ⁽⁴⁾, à des écarts atteignant 8 et 10 pour 100, sur la même vitesse mesurée simultanément par les deux instruments.

Les données certaines que l'on possède à l'heure actuelle sur le fonctionnement de l'anémomètre Robinson en régime permanent sont : 1^o que le rapport $\frac{V}{n}$ varie avec la vitesse du vent; 2^o que la relation qui relie $\frac{V}{n}$ à V change avec les dimensions des organes constituant les moulinets; 3^o que pour un grand nombre de ces derniers une formule à trois termes du genre $V = a + bn + cn^2$ représente mieux les résultats de l'étalonnage que la formule à deux termes $V = a + bn$.

Nous avons vu ⁽⁵⁾ que, pour les anémomètres destinés aux usages météorologiques, une condition indispensable pour mesurer avec précision la vitesse moyenne du vent est, si l'on ne veut pas être entraîné à des enregistrements et des calculs compliqués, que l'équation, qui relie la vitesse de rotation de la partie tournante à la vitesse du courant dans lequel elle est placée, soit de la forme $V = a + bn$.

Il est donc important de rechercher si, en modifiant convenablement les dimensions des bras de moulinets construits avec coupes d'un diamètre donné, on ne pourrait pas rendre négligeable le coefficient du terme en n^2 . On verra que l'expérience fournit le moyen d'y parvenir tout en permettant d'acquérir des indications nouvelles sur l'influence des dimensions relatives des organes au point de vue de la relation qui existe entre les variations de V et celles du rapport $\frac{V}{n}$.

Description des moulinets étudiés. — Avant de rapporter les résultats que nous

⁽¹⁾ Voir ci-dessus, p. 52.

⁽²⁾ DOHRANDT, *Rep. f. Met.*, Bd 6, n^o 3.

⁽³⁾ NEUMAYER, *Archiv der Deutschen Seewarte*, Jahrg. 20, n^o 4.

⁽⁴⁾ NEUMAYER, *Ibid.*

⁽⁵⁾ Introduction, p. 8 et 9.

a fournis leur étude, nous donnerons une brève description des moulinets sur lesquels ont porté nos recherches et dont le nombre se monte à 27 appartenant à sept types différents.

Les neuf premiers sont des moulinets à axe s'orientant parallèlement au vent, les dix-sept autres appartiennent à la catégorie des moulinets à axe perpendiculaire au courant. Nous les avons désignés par des lettres de l'alphabet afin de pouvoir facilement les distinguer les uns des autres en évitant les périphrases. Pour la même raison, les divers types ont été désignés par des chiffres romains.

Moulinets à axe parallèle au vent.

TYPE I. — Moulinets à ailettes planes :

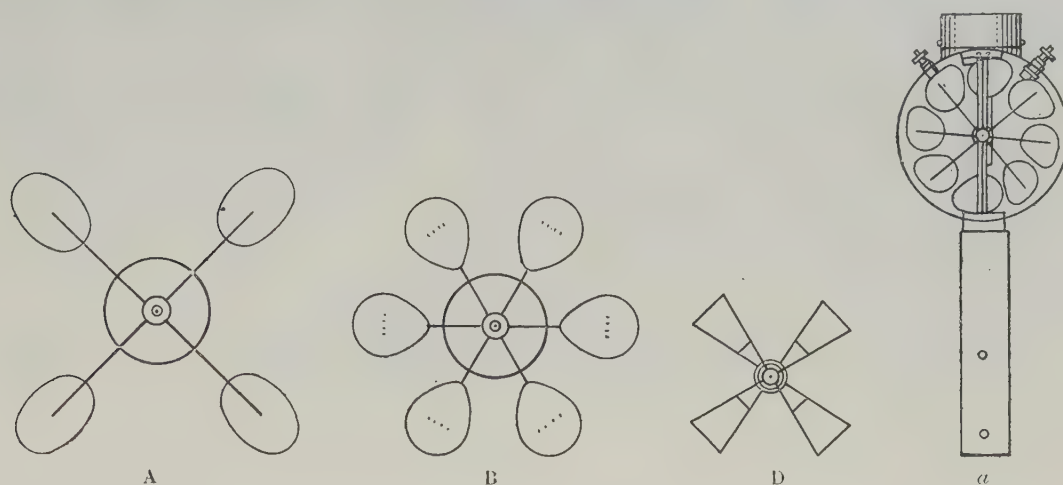
Moulinet A (fig. 10). — Ce moulinet, réalisé au Bureau Central météorologique, est formé de quatre disques de zinc de 10^{cm} de diamètre et 0^{mm},5 d'épaisseur portés par quatre bras fixés en croix à un moyeu de moulinet Richard. Ces bras, faits de quatre fragments de tube de laiton, sont réunis à 13^{cm} de l'axe par un cercle en tige pleine du même métal et dont le diamètre est le même que le diamètre extérieur des bras (3^{mm},5). La longueur de ces derniers, comptée à partir du centre du moulinet, est de 16^{cm}. Les ailettes, engagées suivant un de leurs rayons dans une fente de 5^{cm} de longueur pratiquée à l'extrémité des bras, sont fixées à ceux-ci par l'intermédiaire de deux rivets. Leur inclinaison sur le plan passant par leur centre et perpendiculaire à l'axe de rotation est de 45°.

Le diamètre total du moulinet ainsi réalisé est de 42^{cm}, son poids de 205^g. Il tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pour un observateur qui le regarde en présentant le dos au vent.

Moulinet a (fig. 10). — Ce moulinet constitue l'organe essentiel de l'anémomètre à main Richard. Il n'a pas été étudié à part; les expériences ont été faites sur l'anémomètre complet. Cet instrument est du type qui a été établi pendant la guerre pour l'usage des compagnies de ballons cerfs-volants. Le compteur de tours est remplacé par un contact qui ferme le circuit d'une pile tous les 40 tours de moulinet. Celui-ci comporte huit ailettes en tôle d'aluminium de 0^{mm},25 d'épaisseur, affectant la forme d'oves irrégulières et ayant comme plus grande et plus petite dimensions respectivement 22^{mm} et 33^{mm}. Elles sont fixées à des bras cylindriques en aluminium de 2^{mm} de diamètre passant en avant de leur centre de figure de manière que leur plus courte dimension soit dirigée radialement et que leur plan fasse avec la direction de l'axe un

angle de 45° . L'axe, fait en acier, est terminé en pointe à ses deux extrémités et supporté par deux chapes solidaires d'un cylindre de $91^{\text{mm}},5$ de diamètre

Fig. 10.



Moulinets A, B, D, α.

entourant le moulinet dont le rayon extérieur est de $43^{\text{mm}},75$. Le sens de la rotation est le même que pour le moulinet A.

TYPE II. — Moulinets à ailettes hélicoïdales :

Moulinet B (moulinet Richard normal). — Les six ailettes que comporte ce moulinet affectent la forme d'un ovale irrégulier dont le plus grand diamètre a 102^{mm} de longueur et le plus faible 88^{mm} . Ces diamètres se croisent à angle droit en un point qui divise le plus grand en deux parties égales et le plus petit en deux segments ayant respectivement 39^{mm} et 49^{mm} de longueur, le plus grand de ces segments étant du côté du moyeu. Les palettes sont réunies à ce dernier par des tiges en acier traversant à 57^{mm} de l'axe une bande de métal circulaire de 1^{cm} de largeur et $1^{\text{mm}},5$ d'épaisseur disposée de manière à se présenter au vent par la tranche dans la position de fonctionnement normal (fig. 10).

A l'aide d'une matrice de forme spéciale, le constructeur a donné aux lames d'aluminium, épaisses de $0^{\text{mm}},5$, qui constituent les ailettes la forme de portions d'hélicoïde à pas constant. Chacune d'elles est fixée par des rivets sur une barrette transversale située à l'extrémité du bras correspondant et leur inclinaison est telle que, si l'on fait abstraction de leur forme ovale, leur ensemble représente la figure que l'on obtiendrait en sectionnant par deux plans distants de 8^{cm} et perpendiculaires à son axe une vis à âme creuse ayant 1^{m} de pas et portant six filets de $0^{\text{mm}},5$ d'épaisseur.

Ce moulinet pèse 170^g; son diamètre total est de 32^{cm}. Un observateur, placé le dos au vent, le voit tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.

Moulinets B₁ et B₂. — Ce sont deux moulinets du même modèle que le moulinet B dont les poids sont respectivement 171^g et 174^g. Les ailettes du moulinet B₂ avaient été légèrement déformées. Il a surtout été essayé en vue de s'assurer de l'influence que pouvaient avoir ces déformations sur le rapport $\frac{V}{n}$.

Moulinet C (moulinet Richard dit *renforcé*). — Ce moulinet ne diffère de celui qui vient d'être décrit que par quelques détails :

1^o Chacun des bras portant les ailettes est muni d'un manchon à collerette fixé par des vis à l'intérieur du cercle de renforcement;

2^o Les diamètres des ailettes sont ramenés respectivement à 60^{mm} et 54^{mm} de telle manière que, tout en conservant la forme ovale, leur surface est réduite de moitié;

3^o Le diamètre total du moulinet est ramené à 297^{mm} et son poids à 153^g.

Moulinets C₁ et C₂. — Ce sont des moulinets semblables au précédent dans lesquels les collerettes ont été supprimées.

De plus, dans celui qui est désigné par la lettre C₂, les ailettes ont été décalées de 5^{mm} de sorte que leur centre de figure se trouve reporté à 5^{mm} en arrière du prolongement des bras.

Ils ont comme poids : C₁, 142^g; C₂, 141^g. Leur sens de rotation est le même que celui des moulinets précédents.

TYPE III. — Moulinet à ailettes gauches (*fig. 10*) :

Moulinet D. — Ce moulinet, de dimensions réduites, que j'ai construit à l'atelier du Bureau Central météorologique, est formé d'un noyau de moulinet Richard auquel ont été adaptées quatre tiges d'acier disposées en croix et un manchon muni à 5^{cm} en arrière de quatre autres tiges du même métal semblablement disposées. Avant de souder le manchon, on l'a fait tourner autour du moyeu de telle manière que la droite passant par deux points placés à 106^{mm} de l'axe et situés respectivement sur une tige avant et sur la tige arrière correspondante, fasse, avec le plan passant par les quatre bras avant, un angle de 45°.

Les ailettes sont constituées par des toiles amidonnées tendues entre chaque tige avant et la tige arrière correspondante.

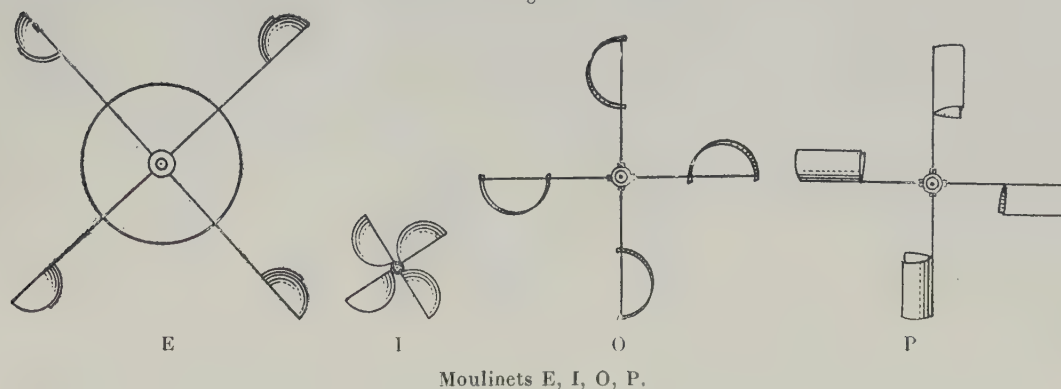
Le moulinet ainsi obtenu se rapproche des précédents, la surface des ailettes pouvant être pratiquement confondue avec celle d'un hélicoïde à pas constant.

Son diamètre total est de 212^{mm}, son poids de 142^g. Le sens de sa rotation est le même que celui des moulinets Richard ci-dessus décrits.

Moulinets à axe perpendiculaire au vent.

TYPE IV. — Moulinets à coupes hémisphériques (*fig. 11*) :

Fig. 11.



Ces moulinets, notés E, F, G, H, H₁, I, J, K, L, M, R, T, U, ont pour la plupart des coupes de cuivre. Deux d'entre eux, K et T, comportent des coupes en aluminium. Leurs caractéristiques sont contenues dans le Tableau ci-après.

Dans la première colonne, A, se trouve la lettre servant à désigner le moulinet. Dans la seconde sont portés, sous la rubrique *d*, les diamètres extérieurs des coupes exprimés en millimètres. Dans la troisième, D, sont inscrits les diamètres des moulinets mesurés de centre en centre de deux coupes opposées et exprimés également en millimètres. Dans la quatrième, B, sont portés les diamètres des tiges métalliques constituant les bras. La cinquième, C, indique le diamètre du cercle de renforcement lorsqu'il existe. A titre d'indication complémentaire, on a ajouté en regard dans une sixième colonne, F, les poids totaux des divers moulinets exprimés en grammes.

Dans le moulinet M, les bras traversent les coupes. Dans tous les autres, ils sont recourbés et fixés par des rivets à l'extérieur de l'hémisphère sur la partie convexe, suivant la manière de faire adoptée par la maison Richard. De plus, les six premiers comportent des coupes identiques fixées à des bras de même diamètre. Ils ne diffèrent les uns des autres, si l'on fait abstraction des cercles de renforcement et du poids, que par la longueur des bras et forment un ensemble que nous appellerons « famille de moulinets ». Il est bon de remarquer que les bras du moulinet M sont filetés sur toute leur longueur. Cette disposition, qui permet de placer les coupes à des distances variables de l'axe de rotation, a été adoptée en vue d'études ultérieures. Dans le moulinet I, les hémisphères sont fixés directement sur le moyeu.

Principales caractéristiques des moulinets Robinson étudiés.

A.	d.	D.	B.	C.	P.
	mm	mm	mm	mm	g
E.....	61,5	402	3,5	178	240
F.....	61,5	316	3,5	158	220
G.....	61,5	240	3,5	"	179
H.....	61,5	159	3,5	"	157
H ₁	61,5	122	3,5	"	152
I.....	61,5	79	"	"	127
J.....	80,5	425	5,0	190	435
K.....	80,5	426	5,0	190	321
L.....	42,5	212	3,5	"	155
M.....	68,0	340	2,5	"	205
R.....	134,0	536,5	6,0	265	1240
T.....	181,0	531,0	6,0	242	846
U.....	105,0	533,0	6,0	280	1060

TYPE V. — Moulinets à coupes hémicylindriques perpendiculaires (génératrices des hémicylindres disposées perpendiculairement aux bras) :

Moulinets N et O. — Ce sont des moulinets analogues au moulinet M dans lequel les hémisphères ont été remplacés par des hémicylindres de 70^{mm},5 de diamètre. Les bras, en tige d'acier filetée de 2^{mm},5 de diamètre, traversent les coupes. Le poids du moulinet N est de 330^g, celui du moulinet O de 322^g. Leurs diamètres, mesurés d'axe en axe des hémicylindres, sont respectivement de 341^{mm},5 (N) et de 229^{mm},5 (O). La hauteur des palettes est de 68^{mm}.

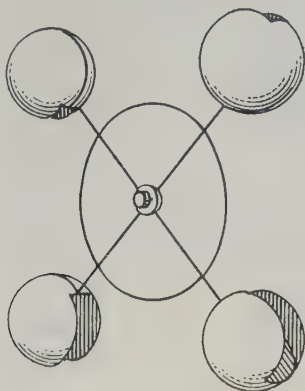
Moulinet Q. — C'est un moulinet à hémicylindres perpendiculaires au plan des bras; mais les ailettes sont munies de demi-bases à leurs extrémités. Les principales données qui le caractérisent sont : diamètre d'axe en axe des hémicylindres, 531^{mm}; diamètre des hémicylindres, 93^{mm}; hauteur des hémicylindres, 91^{mm}; diamètre des bras, 6^{mm}; diamètre du cercle de renforcement, 246^{mm}; poids, 1235^g.

TYPE VI. — Moulinets à palettes hémicylindriques radiales (génératrices des hémicylindres disposées parallèlement au bras, plan diamétral des hémicylindres parallèle à l'axe de rotation) :

Moulinet P. — C'est le seul moulinet de cette catégorie qui ait été étudié. Les bras, en tige d'acier filetée de 2^{mm},5 de diamètre, ont été rivetés et soudés sur le côté convexe des palettes, qui ont les mêmes dimensions que celles des moulinets N et O. La longueur séparant les bords extérieurs de deux palettes opposées est de 310^{mm}. Poids : 326^g.

TYPE VII. — *Moulinet V* (fig. 12). — C'est un moulinet genre Robinson com-

Fig. 12



Moulinet V.

portant quatre sphères creuses dont une demi-zone de hauteur égale au tiers du diamètre de celles-ci est enlevée. Le montage est fait comme le montre la figure 12. Les sphères employées par la maison Richard pour la construction de ce moulinet d'essai mesurent $66^{\text{mm}},5$ de rayon. Les centres de deux sphères opposées sont séparés par une distance de 529^{mm} . Les bras, en tige d'acier cylindrique de 6^{mm} d'épaisseur, sont réunis par un cercle de renforcement dont le diamètre est égal à 276^{mm} . Le poids de l'ensemble est de 1793^{g} .

CHAPITRE III.

VARIATIONS DU FACTEUR ANÉMOMÉTRIQUE SOUS L'INCIDENCE DE FONCTIONNEMENT NORMAL.

Facteur anémométrique. — Nous appellerons *facteur anémométrique* le nombre α , par lequel il faut multiplier le nombre de tours n que fait par seconde un moulinet donné, pour obtenir la vitesse V du courant d'air qui provoque sa rotation. L'instrument idéal serait celui pour lequel ce nombre serait constant et donnerait, une fois multiplié par la vitesse de rotation, la composante de la vitesse du courant suivant l'axe du moulinet (moulinets à axe parallèle) ou perpendiculaire à cet axe (moulinets à axe perpendiculaire). Nous avons réservé le nom de *vitesse de rotation* (n) au nombre de tours effectués par le moulinet dans l'unité de temps; on sait que cette quantité est reliée à la vitesse angulaire ω par la formule $\omega = 2\pi n$.

Incidence. — Nous appellerons *incidence*, *inclinaison* ou *angle d'attaque* du vent sur le moulinet, l'angle formé par les filets d'air avec le plan perpendiculaire à l'axe de rotation mené par le centre des ailettes. Cet angle est le complément de celui que forme l'axe avec la direction du courant. Il s'ensuit que l'incidence de fonctionnement normal est, pour les moulinets à axe parallèle, 90°, et, pour les moulinets à axe perpendiculaire, 0°.

Résultats expérimentaux de l'étude des moulinets anémométriques dans des courants d'air permanents sous l'incidence de fonctionnement normal. — Ces résultats sont consignés dans les Tableaux ci-dessous. Sous la rubrique V sont indiquées les vitesses du courant d'air. La colonne intitulée *n* donne les vitesses de rotation correspondantes. La troisième colonne contient, sous le signe *z*, les valeurs du rapport $\frac{V}{n}$.

Variations du facteur anémométrique en fonction de la vitesse du vent
sous l'incidence de fonctionnement normal.

MOULINETS A AXE PARALLÈLE.

Type I : Moulinets à ailettes planes.

V.	<i>n</i> .	<i>z</i> .	V.	<i>n</i> .	<i>z</i> .
Moulinet A (Lab. Eiffel).			Moulinet <i>a</i> (Lab. Eiffel).		
5,16.....	4,553	1,13	4,10.....	18,605	0,220
7,73..	7,299	1,06	7,06... ..	31,646	0,223
10,62. . . .	10,267	1,03	9,56... ..	41,885	0,228
12,89..	12,674	1,02	14,29.....	62,893	0,227
15,88.....	16,260	0,98	18,71.....	82,136	0,228
			23,71.....	105,263	0,225

Type II : Moulinets à ailettes hélicoïdales.

V.	<i>n</i> .	<i>z</i> .	V.	<i>n</i> .	<i>z</i> .
Moulinet B (Lab. Eiffel).			Moulinet B (Saint-Cyr).		
5,17.....	5,199	0,99	3,98.....	4,060	0,98
10,34.....	10,563	0,98	9,34.....	9,449	0,99
15,51.....	15,817	0,98	15,10.....	15,437	0,98
20,70.....	21,352	0,97	20,23.....	21,157	0,96
25,88.....	26,882	0,96	25,40... ..	27,174	0,93
30,02.....	32,143	0,93	30,51.....	32,943	0,93
			34,81.....	38,396	0,91
			38,24.....	43,029	0,89
			38,82.....	43,554	0,89
			41,82.....	49,020	0,85

V.	n.	z.	V.	n.	z.
Moulinet B ₁ ⁽¹⁾ (Lab. Eiffel, petite buse).			Moulinet B ₂ ⁽²⁾ (Lab. Eiffel).		
5,17.....	5,370	0,96	5,17.....	5,4	0,96
10,34.....	11,086	0,93	10,34.....	10,8	0,96
15,51.....	16,648	0,93	20,70.....	22,0	0,94
20,70.....	22,624	0,91	31,11.....	34,6	0,90
25,90.....	28,935	0,90			
31,11.....	35,545	0,88			
36,33.....	42,998	0,84			
41,04.....	51,813	0,79			
Moulinet C (Lab. Eiffel, grande buse).			Moulinet C (Lab. Eiffel, petite buse).		
5,17.....	5,081	1,02	5,17.....	5,155	1,00
10,34.....	10,667	0,97	10,55.....	10,881	0,97
15,51.....	16,077	0,97	15,51.....	16,181	0,96
20,70.....	21,575	0,96	20,70.....	21,786	0,95
25,88.....	27,322	0,95	25,90.....	27,442	0,94
30,02.....	32,397	0,93	31,11.....	32,823	0,95
			36,33.....	38,803	0,94
			41,56.....	44,843	0,93
Moulinet C ₁ (Lab. Eiffel).			Moulinet C ₂ (Lab. Eiffel).		
4,14.....	4,355	0,95	4,05.....	4,223	0,96
7,23.....	7,587	0,95	7,19.....	7,353	0,98
9,43.....	9,804	0,96	9,54.....	9,585	1,00
11,84.....	12,295	0,96	11,60.....	11,646	1,00
14,20.....	14,706	0,97	14,22.....	14,245	1,00
19,01.....	19,747	0,96	19,04.....	19,142	0,99
23,84.....	24,917	0,96	23,91.....	23,810	1,00
29,69.....	31,447	0,94	29,67.....	30,441	0,98
Moulinet D (Lab. Eiffel).			Moulinet D (Saint-Cyr).		
5,16.....	7,123	0,724	4,05.....	5,406	0,749
10,73.....	15,244	0,704	7,81.....	10,753	0,726
15,69.....	22,189	0,707	8,87.....	12,392	0,713
20,66.....	29,283	0,706	14,68.....	20,492	0,716
25,83.....	36,550	0,707	19,60.....	27,473	0,713
30,40.....	42,080	0,707	24,68.....	34,662	0,712
			29,43.....	41,609	0,707
			33,95.....	48,309	0,703
			38,89.....	55,172	0,705

Type III : Moulinet à ailettes gauches.

⁽¹⁾ Le moulinet B₁ a été essayé monté sur l'anémomètre Richard ordinaire (fig. 4).
⁽²⁾ Le moulinet B₂ monté sur anémomètre Richard ordinaire était relié à un électrocinémographe sur lequel on lisait directement en unités et dixièmes le nombre de tours du moulinet par seconde.

MOULINETS A AXE PERPENDICULAIRE.

Type IV : Moulinets à coupes hémisphériques.

V.	n.	z.	V.	n.	z.
Moulinet E (Saint-Cyr).			Moulinet F (Saint-Cyr).		
4,65.....	0,973	4,78	4,70.....	1,229	3,82
9,23.....	2,373	3,89	9,09.....	3,093	2,94
14,71.....	4,181	3,52	14,64.....	5,310	2,76
19,70.....	5,952	3,31	20,20.....	7,840	2,58
25,23.....	7,987	3,16	25,12.....	10,169	2,47
30,10.....	9,677	3,11	30,79.....	12,799	2,41
			35,11.....	14,851	2,36
Moulinet G (Saint-Cyr).			Moulinet H (Saint-Cyr).		
4,62.....	1,748	2,64	4,88.....	2,799	1,74
9,69.....	4,298	2,25	9,17.....	6,182	1,48
15,56.....	7,692	2,02	14,75.....	10,582	1,39
20,46.....	10,695	1,91	19,81.....	14,591	1,36
25,41.....	13,932	1,82	24,96.....	18,927	1,32
29,83.....	16,304	1,83	30,30.....	23,112	1,31
			34,63.....	26,930	1,29
Moulinet H ₁ (Lab. Eiffel).			Moulinet I (Saint-Cyr).		
4,34.....	3,958	1,10	4,94.....	6,647	0,743
6,96.....	6,462	1,08	9,04.....	13,493	0,670
9,75.....	9,288	1,05	14,77.....	21,739	0,679
14,60.....	14,451	1,01	19,75.....	29,316	0,674
19,12.....	19,172	1,00	24,95.....	36,434	0,684
23,80.....	24,077	0,99	30,15.....	43,988	0,685
28,73.....	29,197	0,98			
Moulinet J (Saint-Cyr).			Moulinet K (Saint-Cyr).		
4,52.....	0,960	4,71	4,53.....	0,949	4,77
9,15.....	2,439	3,75	9,19.....	2,419	3,80
14,96.....	4,425	3,38	14,95.....	4,304	3,47
20,48.....	6,434	3,18	20,01.....	6,164	3,25
Moulinet L (Saint-Cyr).			Moulinet R ⁽¹⁾ (Lab. Eiffel).		
4,85.....	1,965	2,47	4,21.....	0,912	4,62
9,02.....	4,112	2,19	7,12.....	1,653	4,31
14,76.....	7,246	2,04	9,79.....	2,366	4,14
19,86.....	10,327	1,92	14,67.....	3,584	4,09
24,74.....	13,473	1,84	18,91.....	4,762	3,97
30,05.....	16,779	1,79	23,97.....	6,014	3,99
34,68.....	19,802	1,75	28,84.....	7,305	3,95
38,08.....	22,624	1,68			
42,75.....	25,168	1,66			

(1) Les moulinets R, T, U ont été essayés sur un axe spécial construit par la maison Richard et placé verticalement.

V.	n.	z.	V.	n.	z.
Moulinet M (Saint-Cyr).			Moulinet T ⁽¹⁾ (Lab. Eiffel).		
4,43.....	1,182	3,75	4,34.....	0,976	4,45
9,44.....	2,907	3,25	7,25.....	1,712	4,24
15,41.....	5,319	2,90	9,83.....	2,381	4,13
20,28.....	7,513	2,70	14,67.....	3,597	4,08
25,56.....	9,852	2,59	19,07.....	4,732	4,03
			23,97.....	5,932	4,04
			28,65.....	7,009	4,09

 Moulinet U ⁽¹⁾ (Lab. Eiffel).

V.	n.	z.
4,21.....	0,822	5,12
7,12.....	1,529	4,66
9,68.....	2,212	4,38
14,53.....	3,490	4,16
18,91.....	4,637	4,08
23,88.....	5,912	4,04
28,58.....	7,166	3,99

Types V, VI et VII : Moulinets divers.

V.	n.	z.	V.	n.	z.
Moulinet N (Lab. Eiffel).			Moulinet P (Saint-Cyr).		
5,16.....	0,880	5,86	6,88.....	1,683	4,09
11,04.....	2,460	4,49	8,92.....	2,158	4,13
16,20.....	4,155	3,90	14,70.....	3,644	4,03
20,66.....	5,517	3,74	19,82.....	5,000	3,96
			24,46.....	6,270	3,90

V.	n.	z.	V.	n.	z.
Moulinet O (Lab. Eiffel).			Moulinet Q ⁽²⁾ (Lab. Eiffel).		
4,30.....	1,092	3,94	4,28.....	0,425	10,07
9,40.....	2,793	3,34	7,14.....	0,997	7,16
14,95.....	4,902	3,05	9,42.....	1,504	6,26
19,95.....	6,934	2,88	14,27.....	2,586	5,52
25,17.....	9,302	2,71	16,52.....	3,115	5,30
30,53.....	11,830	2,58	18,97.....	3,670	5,17
			23,63.....	4,777	4,95

 Moulinet V ⁽²⁾ (Lab. Eiffel).

V.	n.	z.
6,03.....	0,430	14,36
10,05.....	1,424	7,06
14,80.....	2,627	5,68
16,96.....	3,063	5,54
19,95.....	3,704	5,39
23,75.....	4,438	5,35
26,45.....	4,950	5,34
28,28.....	5,335	5,30

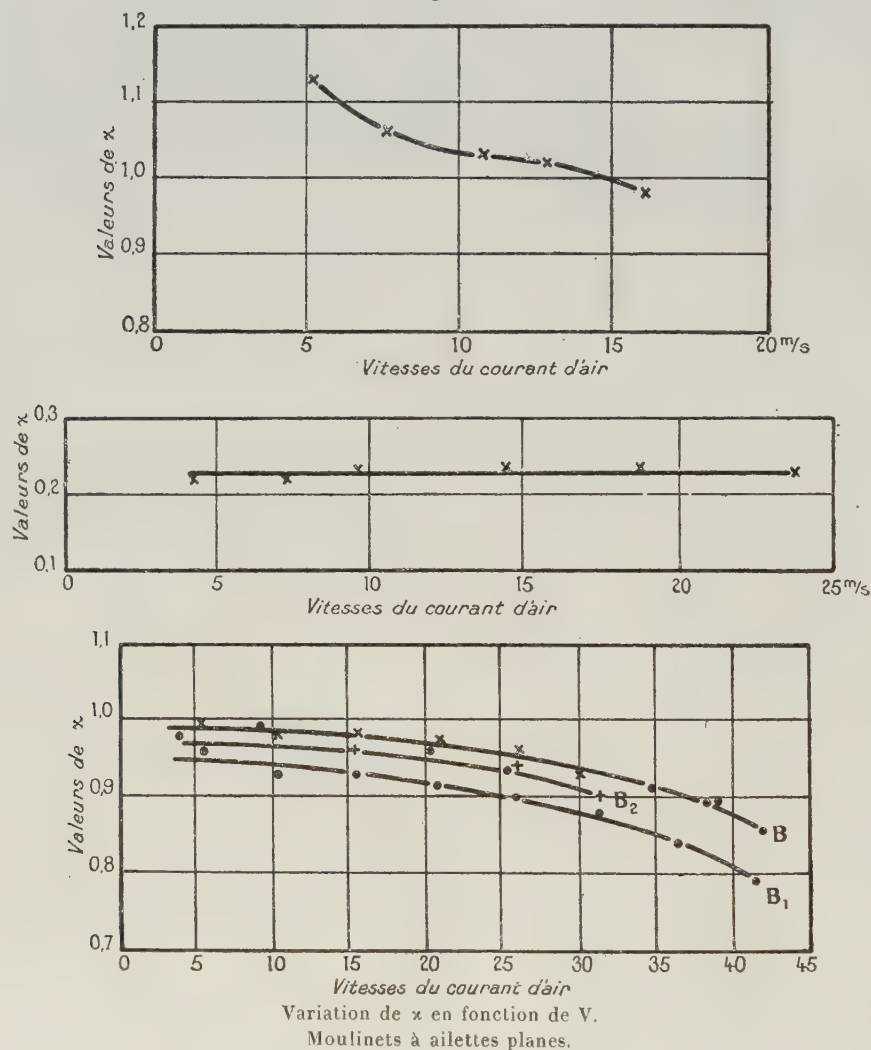
(1) Voir la note de la page précédente.

(2) Ce moulinet a été essayé sur le même axe que les moulinets R, T et U, placé horizontalement.

Discussion des résultats expérimentaux. — Un simple coup d'œil jeté sur les nombres contenus dans les Tableaux ci-dessus permet de se rendre compte immédiatement des différences qui existent entre les moulinets à axe parallèle et les moulinets à axe perpendiculaire au point de vue des relations qui lient leur vitesse de rotation à la vitesse du courant d'air; nous discuterons donc à part les résultats que nous a fournis l'étude de chacune de ces classes d'organes anémométriques.

I. MOULINETS A AXE PARALLÈLE. — La première constatation qui s'impose est que, dans des limites assez larges, la condition $\alpha = \text{const.}$ est très sensiblement

Fig. 13.

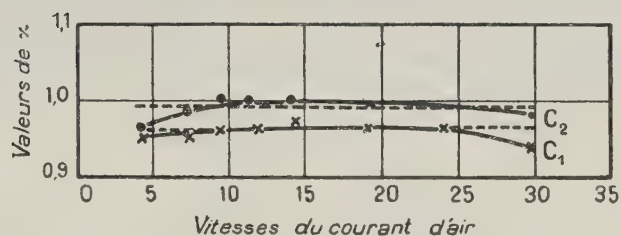
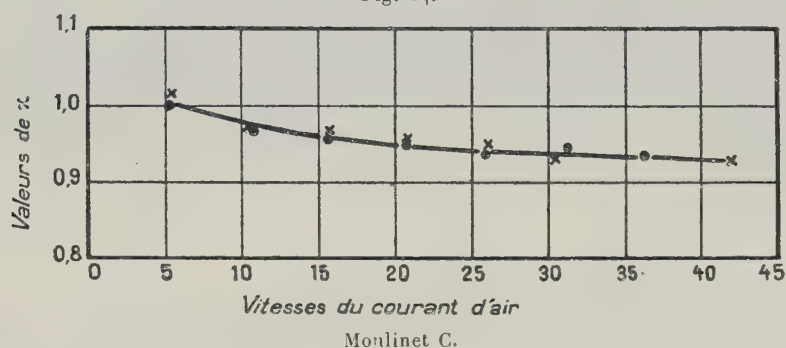


remplie pour un certain nombre de ces moulinets. C'est le cas en particulier pour a entre 4^m et 24^m ; pour C_1 et C_2 entre 4^m et 30^m ; pour D entre 10^m et 39^m (voir fig. 13, 14, 15).

Cependant un examen plus attentif montre que cette condition ne peut être satisfaite que dans des limites de vitesse plus ou moins larges et qu'un certain nombre de causes, que nous avons laissées de côté dans la théorie élémentaire du fonctionnement de ces organes exposée au Chapitre précédent, doivent intervenir pour modifier la relation entre leur vitesse de rotation et la vitesse du courant d'air dans lequel ils sont placés.

D'abord le rapport α subit, aux faibles vitesses, pour certains moulinets, une décroissance très nette qui paraît s'amortir rapidement. Ensuite, pour ces moulinets, le facteur anémométrique, après être resté à peu près constant, tend de nouveau à décroître aux vitesses élevées. Ce décroissement, très accusé pour A, est beaucoup plus faible pour B, B₁, B₂; il s'affaiblit encore pour les moulinets C, C₁, C₂ et D, et est à peine indiqué pour α .

Fig. 14.



Moulinets C₁ et C₂.
Variation de α en fonction de V .
Moulinets à ailettes hélicoïdales.

En examinant les courbes obtenues en portant en ordonnées les valeurs de α et en abscisses les valeurs de V correspondantes, on est conduit à penser que les variations que subit α à mesure que V augmente doivent être causées d'une part par les frottements de l'axe sur ses coussinets et la résistance opposée par l'air au mouvement des bras portant les ailettes, d'autre part par des déformations que subissent ces dernières et qui auraient pour effet de changer l'angle sous lequel elles sont attaquées par les filets d'air à mesure que la vitesse du vent augmente.

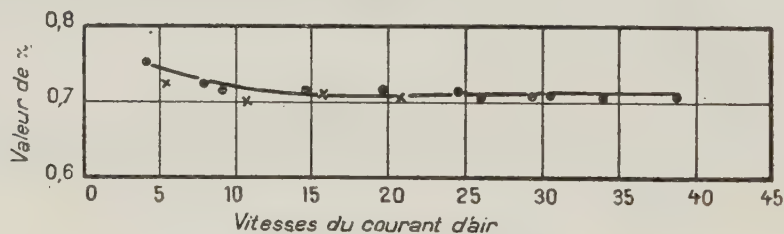
On constate, en effet, d'une part, que le décroissement de α pour les faibles

vitesse (5^m à 10^m) est d'autant plus important que le moulinet est plus lourd et que la surface totale des ailettes est plus faible; d'autre part, qu'aux vitesses élevées, la variation du facteur anémométrique est d'autant plus nette que les dimensions des ailettes sont plus grandes (moulinets B, B₁, B₂).

Cherchons à nous rendre compte des modifications apportées au mouvement de rotation par les résistances dues au frottement et à l'action de l'air sur les bras.

Le frottement peut être considéré comme constant. Il n'en est pas de même de la résistance déterminée par le mouvement de rotation des bras. Celle-ci croît proportionnellement au carré de leur vitesse par rapport à l'air, soit très sensiblement proportionnellement au carré de la vitesse du courant. Pour vaincre ces deux effets, les filets d'air, au lieu de s'écouler tangentiellement à la surface de l'ailette, doivent faire avec celle-ci un certain angle de manière que la pression exercée sur elle par le vent équilibre à la fois la résistance des bras et les frottements de l'axe sur ses coussinets. L'angle diminuera quand la vitesse du vent augmentera, puisque les forces à équilibrer sont, l'une constante, l'autre proportionnelle au carré de la vitesse du courant, et que la pression de l'air sur l'ailette, si l'angle d'attaque restait constant, croîtrait proportionnellement au carré de la vitesse.

Fig. 15.



Moulinet D.

Variation de z en fonction de V .

Moulinet à ailettes gauches.

Dans ces conditions, au lieu d'avoir $\omega r = V \tan \theta$, on aura $\omega r = V \tan \theta - F(V)$, c'est-à-dire que, pour une certaine vitesse V du vent, la vitesse de rotation sera diminuée d'une certaine quantité, de manière que les ailettes soient attaquées sous l'angle nécessaire pour équilibrer les résistances mises en jeu par la rotation. A partir du moment où la vitesse du courant d'air aura atteint une valeur suffisante pour mettre en mouvement le moulinet, le facteur anémométrique ira en décroissant et tendra vers une valeur constante, d'autant plus rapidement que le frottement sera plus faible.

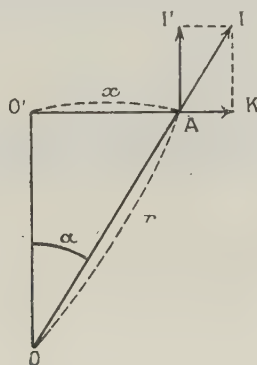
Si l'action du frottement suffit à expliquer la variation de z aux faibles vitesses, il n'en est plus de même en ce qui concerne la diminution que l'on observe aux vitesses élevées. Cette diminution est parfaitement caractérisée pour les moulinets A, B, B₁, B₂ et semble devoir être attribuée à une tor-

sion du bras et de l'ailette qu'il supporte, torsion ayant pour effet d'augmenter l'angle que fait celle-ci avec l'axe du moulinet. Depuis plusieurs années, mon attention avait été attirée sur ce fait par l'examen de moulinets Richard mis hors d'usage par des vents violents. J'avais observé que dans ces organes un certain nombre de bras étaient toujours dessoudés comme si les ailettes avaient été soumises à une forte torsion dans le sens exigé pour les ramener à être perpendiculaires à l'axe de rotation.

En comparant les résultats fournis par les moulinets de la catégorie B à ceux que j'avais obtenus par l'étude de la catégorie C, dont les membres ne diffèrent des premiers que par les dimensions des ailettes, j'ai pensé à rechercher si l'action de la force centrifuge développée par le mouvement de rotation ne pourrait pas fournir l'explication des différences observées.

Considérons une ailette plane faisant avec l'axe de rotation l'angle θ , et sur cette ailette choisissons en A un élément de surface $d\sigma$. Menons par le point A un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Dans ce plan (voir *fig. 16*) la droite $AO = r$ est la perpendiculaire abaissée du point A sur cet axe, $AO' = x$, la plus courte distance de A au plan passant par l'axe et par le bras.

Fig. 16.



Soient α l'angle AOO' , μ la densité superficielle de l'ailette (masse par unité de surface); l'action de la force centrifuge sur le point A est

$$AI = \mu d\sigma \omega^2 r.$$

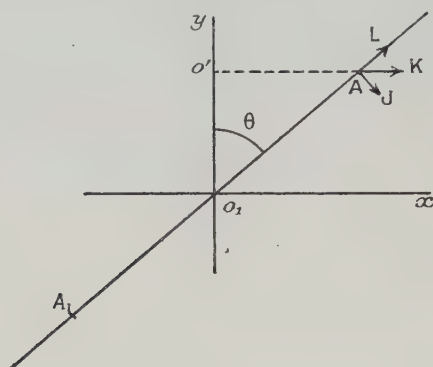
Cette force peut être décomposée en deux autres dans le plan de la figure; l'une, AI' , est équilibrée par la résistance du bras à la traction; l'autre, AK , tend à augmenter l'angle formé par le plan de l'ailette avec l'axe de rotation, elle a comme valeur

$$AK = \mu d\sigma \omega^2 r \sin \alpha.$$

Maintenant menons par $O'A$ un plan perpendiculaire à celui de la figure 16. Ce plan coupe celui de l'ailette suivant la droite $A_1 A$. Par le point O_1 , trace du

bras sur le plan de la nouvelle figure, menons $O_1 O' y$. Cette droite est parallèle à l'axe de rotation et l'angle $AO_1 O'$ est égal à θ . La force AK est contenue dans le plan de la figure 17 et dirigée suivant le prolongement de $O'A$. On

Fig. 17.



peut la décomposer à son tour en deux forces : AL équilibrée par une force égale et contraire agissant sur le point A_1 , symétrique de A par rapport à θ , et AJ normale au plan de l'ailette; cette dernière a comme valeur

$$AJ = AK \cos \theta = \mu d\sigma \omega^2 r \sin \alpha \cos \theta.$$

Le moment de la force AJ par rapport à O_1 est

$$dM = \mu d\sigma \omega^2 r \sin \alpha \cos \theta \times O_1 A$$

et, en posant $O_1 A = l$,

$$dM = \mu d\sigma \omega^2 r l \sin \alpha \cos \theta,$$

mais $\sin \alpha$ peut s'évaluer en fonction de θ .

En effet,

$$\sin \alpha = \frac{AO'}{r} = \frac{l \sin \theta}{r},$$

d'où

$$dM = \mu d\sigma \omega^2 l^2 \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \mu d\sigma \omega^2 l^2 \sin 2\theta.$$

On voit donc que la force centrifuge exerce sur un élément de l'ailette plane considérée une force de torsion dirigée dans un sens tendant à augmenter l'angle θ et dont le moment est proportionnel :

- 1° À la densité superficielle de l'ailette;
- 2° Au carré de sa vitesse angulaire;
- 3° Au carré de la distance séparant le point considéré du prolongement du bras;
- 4° Au sinus du double de l'angle que fait la surface de l'ailette avec l'axe de rotation.

Le moment de la torsion totale exercée sur une ailette plane donnée s'obtiendra en intégrant l'expression ci-dessus et en étendant l'intégrale à toute la surface.

On trouve ainsi que pour une ailette plane de forme carrée (longueur du côté $2a$) le moment par rapport au bras de la torsion totale due à la force centrifuge est donné par l'expression

$$M = \frac{2}{3} \mu \omega^2 a^4 \sin 2\theta.$$

Pour une ailette rectangulaire de largeur $2a$ (comptée perpendiculairement au bras) et de hauteur $2b$ (comptée suivant le bras), on a

$$M = \frac{2}{3} \mu \omega^2 a^3 b \sin 2\theta.$$

Des expressions analogues correspondent au cas où l'ailette est circulaire ou elliptique :

$$M = \frac{\pi}{8} \mu \omega^2 R^4 \sin 2\theta$$

(ailette circulaire de rayon R);

$$M = \frac{\pi}{8} \mu \omega^2 a^3 b \sin 2\theta$$

(ailette elliptique : a = demi-axe perpendiculaire au bras ; b = demi-axe parallèle au bras).

On voit que le moment de la torsion totale exercée par la force centrifuge sur une ailette plane est proportionnel au cube de sa largeur (comptée perpendiculairement au bras) et qu'il est maximum quand l'angle θ est égal à 45° .

Ces quelques considérations suffisent pour expliquer les variations de α observées avec des moulinets munis d'ailettes de même forme, mais de grandeurs différentes.

Les moulinets des catégories B et C ont des ailettes que l'on peut confondre en première approximation avec des ailettes planes de forme elliptique. L'inclinaison moyenne de leur surface sur l'axe de rotation est sensiblement la même, ainsi que leur densité superficielle.

La principale différence qu'ils présentent réside dans les dimensions des ailettes, celles-ci ayant comme axes, dans la catégorie B, $2a = 102^{\text{mm}}$ et $2b = 88^{\text{mm}}$ et, dans la catégorie C, $2a = 80^{\text{mm}}$ et $2b = 65^{\text{mm}}$.

Cette différence suffit à rendre compte du fait, mis en évidence par les expériences, que dans la catégorie B le facteur anémométrique décroît rapidement quand V augmente et que cette décroissance est beaucoup moins accusée pour la catégorie C.

En effet, pour la même vitesse angulaire, les effets de la force centrifuge sur

un moulinet B et sur un moulinet C sont sensiblement dans le rapport de 2,8 à 10. Étant donné le sens dans lequel agit la torsion, il en résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, la même vitesse angulaire doit correspondre pour les moulinets C à une vitesse plus forte du courant d'air que pour les moulinets B.

De plus, les déformations des ailettes se font dans un sens qui tend à accroître la vitesse de rotation et par conséquent l'effet de la force centrifuge. Il s'ensuit que les différences que présente le facteur anémométrique pour une même vitesse du courant d'air, quand on passe de la catégorie B à la catégorie C, doit aller très rapidement en augmentant à mesure que V devient plus grand. Cette conséquence est parfaitement vérifiée par les faits.

La marche spéciale du moulinet A s'explique par des considérations analogues. Comme le rayon de ses ailettes de forme circulaire est de 50^{mm} et que leur densité superficielle est 2,7 fois plus grande que dans les moulinets des catégories B et C, on trouve que, pour une valeur donnée de ω , le moment du couple de torsion dû à la force centrifuge est environ 2,9 fois plus considérable que dans les moulinets B, et sensiblement 8 fois plus fort que dans les moulinets C. La diminution très rapide du facteur anémométrique du moulinet A aux vitesses supérieures à 13 m : sec s'explique donc parfaitement par l'action de la force centrifuge. Cette action est d'ailleurs d'autant plus sensible que les bras faits en tube de laiton n'offrent qu'une résistance relativement faible au couple de torsion.

La considération de la torsion des ailettes par l'action de la force centrifuge, que l'on n'avait pas jusqu'à présent fait intervenir dans l'étude des moulinets anémométriques, permet donc de rendre compte d'une manière satisfaisante de certaines particularités de leur fonctionnement. Elle montre en effet que la grandeur des ailettes, leurs dimensions parallèlement et perpendiculairement aux bras, leur masse, leur inclinaison sur l'axe, jouent un rôle important dans les variations qu'éprouve le facteur anémométrique.

Nous ne pouvons mieux terminer cette discussion qu'en tâchant d'en tirer les conséquences pratiques qu'elle comporte.

Si l'on désire que le facteur anémométrique d'un moulinet donné soit constant dans les plus larges limites de vitesse possible, il est nécessaire de tenir compte du frottement de l'axe sur ses coussinets et de l'action déformatrice de la force centrifuge.

Pour que ce moulinet démarre facilement aux faibles vitesses, il est indispensable, après avoir réduit le plus possible le frottement axial, de donner à ses ailettes une surface totale suffisante pour vaincre celui-ci même aux vitesses très faibles.

Cette surface une fois déterminée, il y a avantage à la réaliser plutôt en multipliant le nombre des ailettes qu'en augmentant la surface de chacune d'elles.

La forme et la disposition des ailettes sur les bras doivent être choisies de manière

à rendre minimum le couple de torsion résultant de la force centrifuge. Pour cela, il vaut mieux les allonger dans le sens radial que dans le sens perpendiculaire aux bras.

Ceux-ci doivent être construits de manière à offrir la plus grande résistance possible aux efforts de torsion et les ailettes doivent être faites d'une matière offrant le maximum de rigidité sous le minimum de poids.

Ces conditions résultent immédiatement de la formule donnant le moment de torsion produit par la force centrifuge dans le cas d'une ailette plane rectangulaire. Cette formule montre que ce moment est proportionnel :

- 1° Au cube de la dimension de l'ailette dans le sens perpendiculaire au bras;
- 2° A la longueur de l'ailette comptée dans le sens radial;
- 3° A la densité superficielle de l'ailette (masse par unité de surface);
- 4° Au carré de la vitesse angulaire;
- 5° Au sinus du double de l'angle θ formé par le plan de l'ailette avec l'axe de rotation.

Ces deux dernières constatations montrent qu'il y aura avantage, quand on pourra le faire, à choisir l'angle d'inclinaison des ailettes et le diamètre du moulinet de manière que la vitesse de rotation ne soit pas trop grande. Pour les moulinets de faible diamètre, il paraît avantageux, vu les grandes valeurs qu'atteint la vitesse angulaire, de réaliser la surface totale d'ailettes, nécessaire pour obtenir la sensibilité que l'on désire, plutôt en multipliant le nombre de celles-ci qu'en augmentant la surface de chacune d'elles.

II. MOULINETS A AXE PERPENDICULAIRE : 1° *Moulinets Robinson*. — Variation des coefficients de la formule anémométrique en fonction du diamètre des moulinets.

La discussion des résultats obtenus pour les moulinets à axe perpendiculaire conduit à un certain nombre de conclusions qui offrent également leur intérêt.

Pour ceux-ci, d'une manière générale (voir fig. 18, 19, 20, 21), le facteur anémométrique dépend dans une large mesure de la vitesse du vent et, à deux exceptions près (moulinets I et T), décroît à mesure que celle-ci augmente dans toute l'étendue des vitesses expérimentées. De plus, pour une valeur donnée de V , il ne paraît pas exister de relation simple entre la vitesse linéaire du centre des coupes et le diamètre des divers moulinets. En gros, la vitesse de rotation croît quand le diamètre diminue, mais la loi à laquelle obéit cet accroissement ne peut s'exprimer par une fonction linéaire du diamètre.

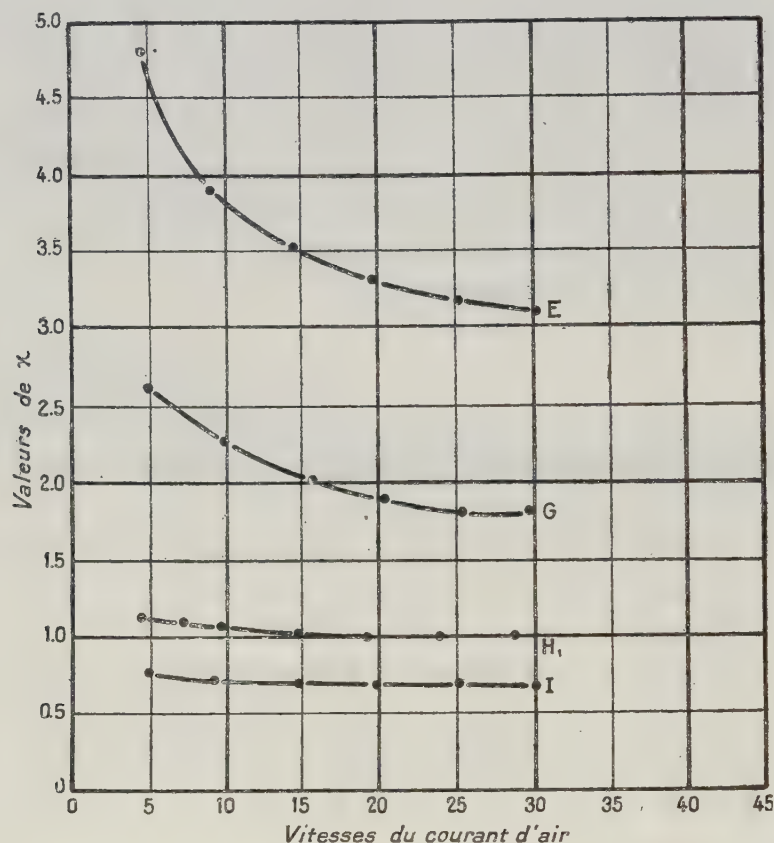
Au point de vue pratique, on a coutume de représenter les résultats du tarage des anémomètres à moulinet Robinson par des formules dites *formules anémométriques*, qui permettent de calculer la vitesse du vent d'après la vitesse de

rotation de ces instruments. Ces formules, tout empiriques, sont de la forme

$$V = a + bn + cn^2 + dn^3 + \dots$$

En général, les trois premiers termes suffisent pour représenter les mesures avec une précision convenable.

Fig. 18.



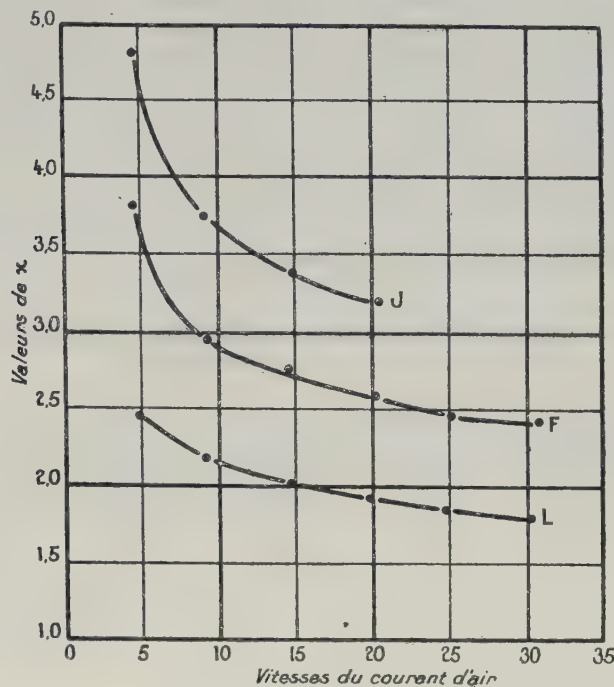
Variation de x avec la vitesse du vent et le diamètre du moulinet. Moulinets E, G, H, I.

Il serait extrêmement intéressant de connaître comment varient les coefficients de la formule anémométrique quand on vient à changer les dimensions du moulinet. En particulier, il serait très utile de savoir si, par des modifications convenables, on ne pourrait pas annuler le coefficient du terme en n^2 et ramener ainsi à la forme linéaire l'équation liant la vitesse de rotation à la vitesse du vent, condition indispensable pour que les vitesses moyennes du vent mesurées à l'aide de ces organes ne soient pas affectées par sa variabilité.

C'est dans le but de me livrer à cette recherche, déjà tentée d'ailleurs par Dohrandt, que j'ai fait établir par la maison Richard les cinq moulinets E, F, G, H, I, dont les diamètres sont entre eux sensiblement comme les nombres 5, 4, 3, 2, 1, et qui sont tous construits avec des coupes semblables fixées à des bras découpés dans la même tige d'acier. Ces moulinets forment une famille dont les

membres sont aussi comparables que possible, quoique deux d'entre eux seulement soient munis d'un cercle de renforcement (E et F) et que le dernier (I) soit dépourvu de bras, les hémisphères étant fixés directement sur le moyeu.

Fig. 19.


Variation de x en fonction de V . Moulinets J, F, L. Rapport $\frac{d}{D} = 0,2$.

J'ai donc déterminé pour chacun d'eux les coefficients de la formule anémométrique. Voici les résultats de la comparaison des vitesses calculées à l'aide de ces formules et des vitesses observées directement :

Moulinet E.

$$\text{Formule } V = 1,51 + 3,347n - 0,047n^2.$$

V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} - V _{obs.}
4,73	4,65	0,08
9,19	9,23	-0,04
14,69	14,71	-0,02
19,77	19,70	0,07
25,25	25,23	0,02
30,50	30,10	0,40

Moulinet F.

$$\text{Formule } V = 1,59 + 2,552n - 0,023n^2.$$

V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} - V _{obs.}
4,69	4,70	-0,01
9,27	9,09	0,18
14,49	14,64	0,15
20,19	20,20	-0,01
25,17	25,12	0,05
30,49	30,79	-0,30

Moulinet G.

$$\text{Formule } V = 1,30 + 1,994n - 0,018n^2.$$

V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} - V _{obs.}
4,73	4,62	0,11
9,53	9,69	-0,16
15,57	15,56	0,01
20,56	20,46	0,10
25,58	25,41	0,17
29,02	29,83	-0,81

Moulinet H.			Moulinet I.		
Formule $V = 1,28 + 1,287n - 0,0014n^2$.			Formule $V = 0,85 + 0,604n + 0,0014n^2$.		
V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} — V _{obs.}	V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} — V _{obs.}
4,87	4,88	—0,01	4,92	4,94	—0,02
9,18	9,17	0,01	9,25	9,04	0,21
14,74	14,75	—0,01	14,64	14,77	—0,13
19,76	19,81	—0,05	19,76	19,75	0,01
25,14	24,96	0,18	24,71	24,95	—0,24
30,28	30,30	—0,02	30,12	30,15	—0,03

Le tableau ci-dessous permet de se rendre compte de l'influence du diamètre D sur les coefficients de la formule $V = a + bn + cn^2$.

Variation des coefficients de la formule anémométrique en fonction du diamètre dans une famille de moulinets Robinson.

	a.	b.	c.	D. mm
Moulinet E.	1,51	+ 3,347	— 0,047	402
» F.	1,59	+ 2,552	— 0,023	316
» G.	1,30	+ 1,994	— 0,018	240
» H.	1,28	+ 1,287	— 0,0014	159
» I.	0,85	+ 0,604	+ 0,0014	79

Le coefficient b , que nous appellerons *constante anémométrique*, peut s'exprimer en fonction de D par une formule linéaire : $b = \nu + \lambda D$; dans le cas étudié ci-dessus, $\nu = 0,065$ et $\lambda = 0,00846$.

Le coefficient c , sensiblement nul pour les faibles diamètres, croît rapidement en valeur négative à partir du moment où le rapport du diamètre des coupes à celui du moulinet atteint la valeur 0,35.

Le coefficient a est également fonction des dimensions et est nettement plus petit pour les moulinets à courts bras.

Il semble qu'un organe construit avec des coupes semblables à celles que comportent les cinq moulinets étudiés et dont le diamètre serait égal au double de celui des coupes aurait une formule exactement linéaire avec une constante anémométrique voisine de l'unité.

Vérification expérimentale. — Pour m'en assurer, j'ai demandé à M. J. Richard de faire raccourcir les bras du moulinet H. Le nouveau moulinet ainsi obtenu, H₁, dont le diamètre est de 122^{mm}, a donné aux essais des résultats conformes à ceux que l'on pouvait prévoir d'après l'étude précédente.

Sa formule est très sensiblement linéaire et sa constante a a une valeur tout à fait comparable à celle que l'on peut calculer d'après son diamètre.

On a trouvé

$$b_{\text{calc.}} = 0,962, \quad b_{\text{obs.}} = 0,959.$$

Sa formule déduite des mesures est

$$V = 0,72 + 0,959n.$$

Elle fournit les résultats suivants :

Moulinet H₁.

Formule $V = 0,72 + 0,959n$.

V _{calc.}	V _{obs.}	V _{calc.} — V _{obs.}
4,52	4,34	0,18
6,96	6,92	0,04
9,75	9,63	0,12
14,60	14,58	0,02
19,12	19,11	0,01
23,80	23,81	—0,01
28,73	28,73	0,00

Il semble donc bien que dans une famille de moulinets Robinson la constante anémométrique peut se représenter, en fonction du diamètre, par une formule linéaire dont les constantes sont en relation avec le diamètre des coupes et la section des bras.

De plus, dans chaque famille il existe un moulinet dont la formule anémométrique est exactement linéaire. Ce dernier résultat est conforme à celui que Dohrandt ⁽¹⁾ a obtenu en expérimentant au manège. Mais la concordance va encore plus loin. La discussion des nombres fournis par cet auteur montre que la valeur du rapport $\frac{d}{D}$ pour laquelle cette condition est réalisée est 0,5 pour un moulinet à coupes de 161^{mm}. C'est exactement le résultat que nous obtenons avec les hémisphères de 62^{mm}. Nous pouvons donc énoncer la règle pratique suivante :

La formule anémométrique d'un moulinet à coupes hémisphériques muni de bras cylindriques est pratiquement linéaire quand le rapport $\frac{d}{D}$ s'écarte peu de 0,5.

Il n'y a donc pas intérêt à allonger les bras au delà de la longueur déterminée par ce rapport; au point de vue anémométrique, on perdrait en précision ce que l'on gagnerait en sensibilité.

Influence de la force centrifuge. — L'augmentation du rayon des coupes sans changement du diamètre du moulinet se traduit par une diminution de la constante anémométrique. La vitesse de rotation est notablement augmentée surtout aux faibles vitesses du courant d'air (moulinets U et R).

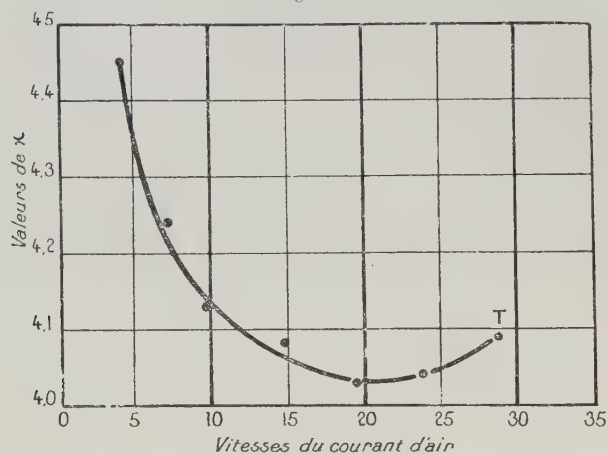
Mais si les coupes sont facilement déformables, cet effet peut être complè-

⁽¹⁾ DOHRANDT, *Bestimmung der Anemometer-Constanten* (Rep. f. Met., t. VI, n° 5, 1878).

tement masqué aux vitesses élevées par l'action de la force centrifuge (moulinets R et T).

Mon attention a été attirée sur cette influence de la force centrifuge par la forme spéciale qu'affecte la courbe $\frac{V}{n} = f(V)$ pour le moulinet T (voir fig. 20).

Fig. 20.



Variation de x en fonction de V . Moulinet T.
Influence de la force centrifuge.

Celui-ci comporte des coupes en aluminium de 181^{mm} de diamètre et de 1^{mm} d'épaisseur. Son facteur anémométrique, minimum pour $V = 20$ m : sec, s'accroît nettement pour les vitesses du courant d'air supérieures à cette limite. Cet effet résulte vraisemblablement de la déformation des coupes provoquée par la rotation, déformation dont le résultat est de déplacer le centre de poussée vers les diamètres croissants.

L'action déformatrice de la force centrifuge est loin d'être négligeable; un calcul approximatif permet de s'en rendre compte.

Si l'on considère séparément l'effet de cette force sur la moitié intérieure et la moitié extérieure d'une des coupes du moulinet T, la masse de chacune de ces moitiés étant supposée condensée en son centre de gravité, on trouve que, pour une vitesse du courant d'air égale à 25 m : sec et en admettant comme poids total de la coupe 150g, la moitié située le plus près de l'axe est soumise à une force d'arrachement égale en gros à 625g, tandis que la moitié extérieure subit une action dont l'intensité est voisine de 840g. Comme il suffit de placer sur le bord de la coupe un poids de 100g pour obtenir un aplatissement très notable, on comprend parfaitement que la force centrifuge produise une déformation qui se traduit par une augmentation du diamètre du moulinet. La vitesse de rotation doit donc être moindre que celle à laquelle on pourrait s'attendre si la coupe conservait sa forme primitive, et c'est bien ce que l'expérience permet de constater.

On conçoit alors l'influence que peut avoir la flexibilité des coupes et par suite la manière dont elles sont fixées aux bras. Toutes choses égales d'ailleurs, la déformation sera moins importante quand les bras traverseront les coupes suivant un diamètre. Si la coupe est rivetée par sa partie convexe à l'extrémité des bras préalablement recourbée, la déformation sera d'autant moins à craindre que cette partie recourbée sera plus rigide et embrassera une portion plus considérable de l'hémisphère.

Ces considérations expliquent pourquoi dans le moulinet M dont les bras traversent les coupes, le rapport $\frac{V}{n}$ décroît plus rapidement aux vitesses élevées qu'on ne pourrait s'y attendre d'après le rapport existant entre son diamètre et celui de ses ailettes et les résultats obtenus avec les autres moulinets.

C'est peut-être également à l'action de la force centrifuge que doit être attribuée la différence assez légère de la constante anémométrique des moulinets J et K que n'expliquent pas complètement les différences de diamètres.

Le premier, J, a pour formule

$$V = 1,40 + 3,306n - 0,054n^2;$$

le second, K,

$$V = 1,34 + 3,384n - 0,054n^2.$$

Les constantes 3,306 et 3,384 devraient être dans le rapport des diamètres 425^{mm} et 426^{mm}, c'est-à-dire que la constante du second devrait être

$$\frac{3,306 \times 426}{425} = 3,314;$$

cependant la différence entre ce nombre et celui qu'a fourni l'observation (23 pour 1000) est trop faible et a une valeur trop voisine de celle des erreurs de mesure pour que l'on puisse conclure d'une manière absolument certaine.

Conclusions. — En résumé, voici les conclusions qui se dégagent de nos expériences :

a. Dans une famille de moulinets Robinson, la vitesse de rotation d'un moulinet pour une vitesse donnée du courant d'air croît quand le diamètre va en décroissant, mais la loi qui relie la vitesse de rotation au diamètre n'est pas simple. Elle varie d'une famille à l'autre et n'est pas la même aux diverses vitesses du courant d'air.

b. Le facteur anémométrique est une fonction complexe des dimensions des organes du moulinet et de la vitesse du vent.

c. Si l'on calcule les formules anémométriques des divers moulinets d'une même famille, on trouve que la *constante anémométrique* croît avec le diamètre suivant une loi qui se représente assez bien par une formule linéaire. La cons-

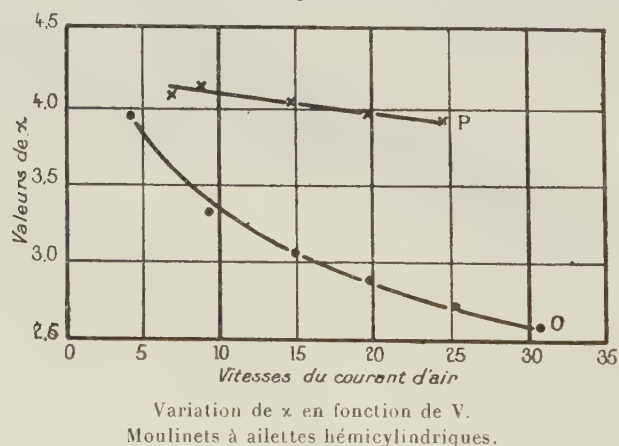
tante a est en général plus faible pour les moulinets à bras courts. La constante c négligeable pour ceux-ci croît en valeur négative quand le rapport du diamètre des coupes à celui du moulinet va en décroissant.

d. Quand, sans changer le diamètre d'un moulinet, on lui adapte des coupes plus grandes, sa constante anémométrique diminue. Cet effet peut cependant être masqué par les déformations des hémisphères sous l'action de la force centrifuge.

e. Les phénomènes mis en jeu par la rotation de ces moulinets sont tellement complexes qu'il paraît préférable de regarder chacun d'eux comme constituant une individualité à part. L'étalonnage de chaque anémomètre Robinson s'impose donc si l'on veut obtenir des mesures comparables.

2° *Moulinets divers.* — Certains expérimentateurs ont construit des anémomètres avec moulinets genre Robinson dans lesquels les coupes étaient remplacées par des hémicylindres disposés de manière que leur plan diamétral soit contenu dans le plan mené par l'axe et le bras correspondant. Aucun de ces moulinets n'ayant été étudié jusqu'à présent au laboratoire, il est intéressant de comparer leur fonctionnement à celui des moulinets à coupes hémisphériques. La figure 21 montre comment varie α en fonction de V pour deux de ces organes munis, l'un d'ailettes disposées radialement (P), l'autre d'ailettes perpendiculaires aux bras (O).

Fig. 21.



Un troisième moulinet, noté N, est de dimensions comparables au moulinet Robinson M. Ses bras, comme ceux de ce dernier, sont faits en tige d'acier filetée et traversent les coupes.

La formule anémométrique trouvée pour M est

$$V = 1,06 + 2,996n - 0,056n^2; \quad \frac{c}{b} = 0,019.$$

Pour N, elle est

$$V = 1,78 + 4,052n - 0,131n^2; \quad \frac{c}{b} = 0,032.$$

La substitution aux coupes hémisphériques de palettes hémicylindriques disposées perpendiculairement aux bras a donc comme résultat de diminuer la vitesse de rotation et d'augmenter, dans une proportion considérable, le coefficient du terme en n^2 .

De même que dans les moulinets à coupes hémisphériques, le rapport de c à b va en décroissant à mesure que le diamètre du moulinet diminue, celui des palettes étant maintenu constant : le moulinet O dont le diamètre est 229^{mm},5, tandis que celui de N est 341^{mm},5 a comme formule

$$V = 1,00 + 3,117n - 0,055n^2,$$

et le rapport $\frac{c}{b}$, qui pour N était 0,032, tombe pour O à 0,017.

L'emploi des palettes hémicylindriques perpendiculaires aux bras ayant pour effet d'augmenter l'importance du terme en n^2 par rapport au terme en n dans la formule anémométrique, cette modification est loin de constituer un progrès. Il serait de beaucoup préférable d'adopter les ailettes hémicylindriques disposées radialement comme le prouve l'exemple du moulinet P. En effet, pour celui-ci, dont les dimensions sont presque identiques à celles du moulinet O, une formule à deux termes :

$$V = 0,65 + 3,814n,$$

représente parfaitement les résultats des mesures.

Les moulinets Q et V constituent de simples curiosités. Je n'ai cependant pas cru devoir les passer complètement sous silence et les mesures dont ils ont fait l'objet ont été signalées à titre documentaire.

CHAPITRE IV.

VARIATIONS DU FACTEUR ANÉMOMÉTRIQUE EN FONCTION DE L'INCLINAISON DU VENT PAR RAPPORT AU PLAN DU MOULINET.

Importance de ces recherches. — J'aborderai maintenant l'étude des variations qui s'introduisent dans le fonctionnement des moulinets anémométriques lorsque les filets d'air, au lieu d'attaquer le plan de ces derniers suivant l'incidence

correspondant aux conditions de fonctionnement normal, le rencontrent suivant une inclinaison différente.

Cette étude, dont l'importance, considérable au point de vue de l'interprétation des mesures de la vitesse du vent naturel, est fondamentale en ce qui concerne la détermination de la composante verticale de la vitesse de cet élément à l'aide des anémomètres à rotation, n'a pas été tentée jusqu'à présent en ce qui concerne les moulinets à axe parallèle. Elle a été ébauchée par Hasenkamp ⁽¹⁾ pour les moulinets Robinson; mais comme il opérait par la méthode du manège et n'avait aucune indication précise pour rapporter ses mesures au mouvement rectiligne, il n'a pu tirer de ses expériences qu'un nombre de conclusions assez restreint dont voici le détail :

1^o La vitesse de rotation de l'anémomètre à axe incliné est liée à la vitesse de son déplacement par rapport à l'air par une formule linéaire comme lorsque son axe est placé verticalement; mais cette vitesse de rotation est tellement différente de celle que l'on enregistre dans la position verticale, que l'étalonnage au manège d'un anémomètre Robinson dans une position autre que cette dernière est inadmissible.

2^o L'influence de l'inclinaison ne peut être négligée que lorsqu'elle est très faible et de l'ordre de celles qui se produisent pour les anémomètres montés à la cardan sur les bateaux ou à bord des ballons.

3^o Une discussion théorique des observations faites avec des anémomètres à axe incliné paraît tout à fait impossible à cause de la complication des phénomènes qui interviennent pour en modifier le fonctionnement.

Les expériences de Hasenkamp n'ont d'ailleurs été poussées que jusqu'à l'inclinaison 60° (par rapport au plan du moulinet), inclinaison insuffisante si l'on veut se rendre compte de la valeur de l'anémomètre Robinson considéré comme instrument de mesure de la composante verticale.

L'étude des variations de la vitesse de rotation des moulinets anémométriques, en fonction de l'inclinaison du vent par rapport à leur plan, constitue donc un champ d'investigations à peu près inexploré, d'ailleurs difficile à exploiter fructueusement par le procédé du manège, mais susceptible de fournir par la méthode que j'ai pu mettre en œuvre grâce à la bienveillance de M. G. Eiffel et à l'amabilité de M. Toussaint une moisson de résultats d'un haut intérêt au point de vue des mesures anémométriques.

Résultats expérimentaux. — L'ensemble de ces résultats, dont le détail est donné dans les Tableaux qui vont suivre, constitue un document tout à fait

(1) *Archiv. D. Seew.*, Jahrg. XIII, 1890, n° 3.

nouveau qui, tout en fournissant des indications précises sur la manière dont est modifiée la vitesse de rotation des anémomètres par l'inclinaison du vent par rapport à leur plan, permet de se rendre compte de la valeur des moulinets anémométriques au point de vue de la mesure de la composante verticale de la vitesse du vent.

On se rappellera que, dans ce qui va suivre, les inclinaisons notées i sont mesurées par rapport au plan mené par les bras portant les ailettes du moulinet et qu'elles sont par conséquent égales au complément de l'angle que forment les filets d'air avec l'axe de ce dernier. Les lettres V , n et α ont la même signification que dans les Tableaux donnés au Chapitre précédent. C'est dans ces Tableaux que l'on trouvera les mesures qui forment le complément de celles qui sont exposées ci-dessous. Les vitesses de rotation sont affectées du signe — lorsque le moulinet tourne dans le sens inverse de celui qui correspond aux conditions normales.

En général, on a fait les expériences sous des inclinaisons variant de 20^0 en 20^0 et les vitesses auxquelles on a opéré sont réparties sur une étendue suffisante pour que l'on puisse déterminer le sens et l'ordre de grandeur des variations de α en fonction de V aux diverses incidences. En outre, pour la plupart des moulinets, on a mesuré la vitesse de rotation sous des inclinaisons variant de 10^0 en 10^0 dans un courant d'air de vitesse sensiblement constante et voisine de 15 m : sec.

VARIATIONS DU FACTEUR ANÉMOMÉTRIQUE EN FONCTION DE L'INCLINAISON.

I. — Moulinets à axe parallèle.

Moulinet A (Lab. Eiffel).

Inclinaison 70^0 .			Inclinaison 50^0 .			Inclinaison 30^0 .		
V .	n .	α .	V .	n .	α .	V .	n .	α .
5,16	4,307	1,20	5,16	3,272	1,58	5,16	1,661	3,11
7,73	6,658	1,16	7,73	4,955	1,56	7,73	2,483	3,11
10,83	9,625	1,13	10,83	7,013	1,54	10,93	3,466	3,15
12,89	11,614	1,11	12,89	8,347	1,54	12,89	4,078	3,16
15,93	15,221	1,05	15,98	10,515	1,52	16,03	5,059	3,17

Essai à vitesse constante et inclinaison variable.

V .	i .	n .	α .
12,89	90^0	12,674	1,02
12,89	80	12,500	1,03
12,89	70	11,614	1,11
12,89	60	10,299	1,25
12,89	50	8,347	1,54
12,89	40	6,165	2,09
12,89	30	4,078	3,16
12,89	20	2,520	5,12
12,89	10	0,775	16,63

Pour les inclinaisons inférieures à 9° , le moulinet resté immobile, cependant la moindre dissymétrie provoquée par l'interposition d'un obstacle dans le courant d'air suffit à provoquer la rotation. Le sens de celle-ci dépend de la position occupée par cet obstacle.

Moulinet B (Lab. Eiffel).

Inclinaison 70° .			Inclinaison 50° .			Inclinaison 30° .		
V.	n.	x.	V.	n.	x.	V.	n.	x.
5,17	4,394	1,18	5,17	3,226	1,60	5,17	1,553	3,33
10,34	9,506	1,09	10,34	6,814	1,52	10,34	3,279	3,15
15,51	14,368	1,08	15,51	10,118	1,53	15,51	4,792	3,24
20,70	19,157	1,08	20,70	13,605	1,52	20,70	6,270	3,30
25,88	24,131	1,07						
30,02	29,014	1,03						

Essai à vitesse constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	x.
15,51	90°	15,817	0,98
15,51	80	15,369	1,01
15,51	70	14,368	1,08
15,51	60	12,397	1,25
15,51	50	10,118	1,53
15,51	40	7,692	2,02
15,51	30	4,792	3,24
15,51	20	2,595	5,98

A 15° le moulinet reste immobile. Il en est de même pour toutes les inclinaisons inférieures à cette limite dans un courant d'air à filets parallèles et uniformes.

Moulinet C.

Inclinaison 70° .			Inclinaison 50° .			Inclinaison 30° .		
V.	n.	x.	V.	n.	x.	V.	n.	x.
5,17	4,789	1,08	5,17	3,551	1,44	5,17	1,733	2,98
10,34	9,921	1,04	10,34	7,278	1,42	10,34	3,466	2,98
15,51	14,822	1,05	15,51	10,901	1,42	15,51	5,128	3,03
20,70	19,841	1,04	20,70	14,599	1,42	20,70	6,723	3,08
25,88	24,900	1,04						
30,02	29,880	1,00						

Essai à vitesse constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	x.
15,44	90°	16,025	0,96
15,44	80	15,674	0,99
15,44	70	14,793	1,04
15,44	60	12,909	1,20
15,44	50	10,830	1,43
15,44	35	6,494	2,38
15,44	30	5,059	3,05
15,44	20	2,525	6,11

A 15° , le moulinet tourne lentement et irrégulièrement dans le sens positif. Sous l'inclinaison 10° , le moulinet reste immobile. Il en est de même à 5° et 0° . La moindre dissymétrie dans le courant d'air provoque la rotation dans un sens ou dans l'autre.

Moulinet D (Lab. Eiffel).

Inclinaison 70° .			Inclinaison 50° .			Inclinaison 30° .		
V.	n.	x.	V.	n.	x.	V.	n.	x.
5,16	6,435	0,80	5,16	4,960	1,04	5,16	2,089	2,47
11,04	14,409	0,77	10,84	10,121	1,07	11,04	4,587	2,41
16,20	20,633	0,79	16,00	14,822	1,08	16,20	6,737	2,40
20,66	26,385	0,78	20,66	19,120	1,08	20,66	8,571	2,41
25,83	32,982	0,78						
30,40	39,063	0,78						

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	x.
16,25	90°	22,901	0,71
16,25	80	22,489	0,72
16,25	70	20,891	0,78
16,25	60	18,657	0,87
16,25	50	15,244	1,07
16,25	40	10,834	1,50
16,25	30	6,667	2,44
16,25	20	2,577	6,31
16,25	10	0,000	∞

Pour toutes les inclinaisons inférieures à 10° , le moulinet reste immobile si le courant d'air est bien uniforme.

II. — Moulinets à axe perpendiculaire.

a. MOULINETS ROBINSON.

Moulinet E (Saint-Cyr).

Inclinaison 20° .			Inclinaison 40° .		
V.	n.	x.	V.	n.	x.
4,43	0,967	4,58	4,27	0,890	4,80
9,14	2,423	3,77	9,23	2,344	3,94
14,80	4,230	3,50	14,76	4,261	3,46
19,80	6,061	3,27	19,97	5,997	3,33
24,84	7,924	3,13	25,00	7,752	3,22
30,33	9,877	3,07			

Inclinaison 60° .			Inclinaison 90° .		
V.	n.	x.	V.	n.	x.
4,35	0,444	9,80	4,35	-0,383	-11,36
9,03	1,142	7,91	9,13	-0,840	-10,87
14,94	2,347	6,37	14,64	-1,050	-13,94
19,83	3,509	5,65	19,62	-1,348	-14,55
25,15	4,777	5,46			

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,71	0°	4,181	3,52
14,91	10	4,092	3,64
14,80	20	4,230	3,50
14,63	30	4,399	3,33
14,76	40	4,261	3,46
14,62	50	3,436	4,25
14,94	60	2,347	6,37
14,70	70	0	$\pm\infty$
14,75	80	-0,891	-16,55
14,64	90	-1,050	-13,94

Moulinet F (Saint-Cyr).

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,64	0°	5,310	2,76
14,64	15	5,208	2,81
14,74	30	5,597	2,63
14,85	45	5,085	2,92
15,12	60	3,086	4,90
15,05	70	$+\varepsilon$	très grand
14,79	75	-0,490	-30,18
14,75	90	-1,211	-12,18

Moulinet G (Saint-Cyr).

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,90	1,727	2,84	5,48	2,137	2,56	3,92	0,736	5,33
9,67	4,286	2,26	9,82	4,451	2,21	8,89	2,066	4,30
15,28	7,513	2,03	15,57	7,759	2,01	14,22	3,720	3,82
20,52	10,733	1,91	20,83	10,965	1,90	19,09	5,703	3,35
25,34	13,740	1,84	25,64	13,762	1,86	24,50	7,911	3,10
31,03	17,045	1,82	31,05	17,123	1,81	29,94	10,232	2,93

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
15,56	0°	7,692	2,02
15,30	10	7,353	2,08
15,28	20	7,513	2,03
15,35	30	7,705	1,99
15,57	40	7,759	2,01
15,46	50	6,215	2,49
14,22	60	3,720	3,82
14,50	70	0	$\pm\infty$
14,69	80	-1,572	-9,34
15,08	90	-1,942	-7,77

Moulinet H (Saint-Cyr).

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,75	0°	10,582	1,39
14,66	15	10,381	1,41
14,52	30	10,949	1,33
14,64	45	10,274	1,42
14,41	60	5,597	2,57
14,52	70	+ ε	positif et très grand
14,60	75	— ε	négatif et très grand
14,71	90	— 2,582	—5,70

Moulinet H₁ (Lab. Eiffel).

Inclinaison 10°.			Inclinaison 20°.			Inclinaison 30°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,19	3,759	1,11	4,32	3,870	1,12	4,51	3,994	1,13
7,07	6,380	1,11	7,03	6,394	1,10	7,22	6,557	1,10
9,83	9,077	1,08	9,96	9,174	1,09	10,06	9,346	1,08
14,62	14,019	1,04	14,82	13,850	1,07	14,89	14,225	1,05
18,96	18,382	1,03	19,10	17,382	1,07	19,15	18,456	1,04
23,74	23,697	1,00	23,71	22,321	1,06	23,80	23,659	1,01
28,45	28,455	1,00						
Inclinaison 40°.			Inclinaison 50°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,42	4,032	1,10	4,43	3,460	1,28	4,21	2,008	2,10
7,17	6,557	1,09	7,09	5,804	1,22	7,25	3,788	1,91
10,06	9,346	1,08	10,13	8,460	1,20	9,79	5,457	1,79
14,96	14,205	1,05	15,19	12,894	1,18	14,60	9,091	1,61
18,99	18,209	1,04	18,86	16,207	1,16	19,12	12,887	1,48
23,74	23,256	1,02	23,78	20,833	1,14	23,88	16,807	1,42
Inclinaison 70°.			Inclinaison 80°.			Inclinaison 90°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,21	0,000 $\pm \infty$		4,21	—0,708	—5,95	4,21	—1,211	—3,48
7,39	0,399	18,52	7,12	—1,468	—4,85	7,08	—1,495	—4,74
9,68	0,744	13,01	9,83	—1,429	—6,88	9,51	—1,795	—5,30
14,60	1,859	7,85	14,46	—1,689	—8,56	14,32	—2,095	—6,84
19,12	2,985	6,41	19,07	—1,805	—10,57	19,12	—2,584	—7,40
23,92	4,132	5,79	23,84	—2,049	—11,63	23,88	—3,101	—7,70

Moulinet I (Saint-Cyr).

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,94	6,061	0,82	4,94	5,629	0,88	4,94	4,310	1,15
9,30	11,886	0,78	9,26	11,943	0,78	9,46	10,489	0,90
15,03	19,835	0,76	15,07	19,868	0,76	15,25	18,484	0,83
20,07	26,834	0,75	19,88	25,997	0,77	20,55	26,042	0,79
25,38	34,091	0,74	25,32	34,615	0,73	25,38	33,683	0,75
30,32	40,761	0,74	30,35	41,360	0,73	30,79	41,360	0,74

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,77	0°	21,739	0,68
14,93	10	20,513	0,73
15,03	20	19,835	0,76
15,15	30	19,355	0,78
15,07	40	19,868	0,76
15,10	50	20,101	0,75
15,25	60	18,484	0,83
15,12	70	13,489	1,18
15,10	75	rotation directe	
15,05	80	rotation directe lente	
15,00	85	0	(¹)
15,00	90	0	(²)

Essais à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable (Moul. J, K, L).

Moulinet J (Saint-Cyr).

V.	i.	n.	z.
14,96	0°	4,425	3,38
14,81	15	4,317	3,43
14,94	30	4,601	3,25
15,16	45	4,087	3,71
15,07	60	2,392	6,30
15,00	70	+ε	positif et très grand
14,85	75	—0,358	—41,46
15,22	90	—0,998	—15,25

Moulinet K (Saint-Cyr).

V.	i.	n.	z.
14,95	0°	4,304	3,47
14,87	15	4,202	3,54
14,78	30	4,360	3,39
14,83	45	3,922	3,78
15,07	60	2,377	6,34
15,00	70 (³)	0	± ∞
14,75	75	—0,568	—25,97
14,84	90	—1,190	—12,47

Moulinet L (Saint-Cyr).

V.	i.	n.	z.
14,76	0°	7,246	2,04
14,80	15	7,353	2,01
14,77	30	7,377	2,00
14,72	40	7,067	2,08
14,74	60	3,257	4,26
14,75	65	+ε	positif et très grand
14,80	70	—ε	négatif et très grand
14,78	75	—1,333	—11,09
14,71	90	—2,415	—6,09

⁽¹⁾ Démarre dans le sens direct à 20^m.⁽²⁾ Démarre dans le sens direct à 25^m.⁽³⁾ Sous l'inclinaison 70°, le moulinet K tourne lentement dans le sens positif quand la vitesse du courant d'air atteint 20 m : sec.

Moulinet M (Saint-Cyr).

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,28	1,104	3,88	4,31	0,962	4,48	3,99	0,355	11,21
9,42	2,768	3,40	9,34	2,517	3,71	9,14	1,188	7,69
15,08	4,777	3,16	14,53	4,484	3,24	14,77	2,664	5,51
20,24	7,064	2,87	20,06	6,726	3,20	20,29	3,339	6,08

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
15,41	0°	5,319	2,90
15,25	10	5,008	3,05
15,08	20	4,777	3,16
15,08	30	4,808	3,14
14,53	40	4,484	3,24
14,87	50	3,676	4,05
14,77	60	2,664	5,54
14,80	70	0	± ∞
14,62	75	—0,618	—23,66
14,90	82,5	—1,595	—9,34
15,11	90	—1,739	—8,69

b. MOULINETS A AILETTES HÉMICYLINDRIQUES.

Moulinet N (Lab. Eiffel).

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
5,15	0,933	5,52	5,15	0,849	6,07	5,15	0,406	12,69
10,29	2,358	4,36	10,28	1,949	5,28	10,29	0,909	11,32
15,44	3,891	3,97	15,44	3,012	5,13	15,44	1,416	10,90
20,60	5,556	3,71	20,60	4,193	4,91	20,60	1,898	10,58

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
15,44	0°	3,727	4,14
15,44	10	3,667	4,21
15,44	20	3,922	3,94
15,44	30	3,713	4,16
15,44	40	3,012	5,13
16,31	50	2,423	6,73
15,44	60	1,416	10,90
16,41	70	+ε	positif et très grand
16,23	75	0	± ∞
15,44	80	—ε	négatif et très grand
15,44	90	—ε	id.

Moulinet O (Saint-Cyr).

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,86	1,368	3,35	4,31	1,109	3,89	4,34	0,581	7,47
9,32	2,988	3,12	9,02	2,636	3,42	9,44	1,458	6,47
15,16	5,300	2,86	14,96	4,484	3,34	15,09	2,408	6,27
20,49	7,601	2,70	19,88	6,048	3,29	20,16	3,174	6,35

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,95	0°	4,902	3,05
14,98	10	4,918	3,05
15,16	20	5,300	2,86
14,51	30	5,146	2,82
14,96	40	4,484	3,34
15,01	50	3,263	4,60
15,09	60	2,408	6,27
15,22	70	0,572	26,61
15,10	80	+ε	positif et très grand
14,95	90	+ε	id.

Moulinet P.

Inclinaison 20°.			Inclinaison 40°.			Inclinaison 60°.		
V.	n.	z.	V.	n.	z.	V.	n.	z.
4,29	0,903	4,75	4,32	1,238	3,49	4,34	0,896	4,84
8,89	1,942	4,58	8,84	2,650	3,34	8,72	1,366	6,38
14,38	3,226	4,46	14,42	4,405	3,27	14,38	2,435	5,91
19,46	4,481	4,34	19,09	5,952	3,21	19,09	3,215	5,94
Inclinaison 80°.			Inclinaison 90°.					
V.	n.	z.	V.	n.	z.			
4,32	-0,714	-6,05	4,44	-0,916	-4,85			
8,92	-1,449	-6,16	8,78	-1,818	-4,78			
14,79	-2,419	-6,11	14,63	-3,012	-4,86			
19,19	-3,215	-5,97	19,87	-4,087	-4,86			

Essai à vitesse sensiblement constante et inclinaison variable.

V.	i.	n.	z.
14,70	0°	3,644	4,03
14,65	10	3,086	4,75
14,38	20	3,226	4,46
14,33	30	3,676	3,90
14,42	40	4,405	3,27
14,44	50	4,498	3,21
14,38	60	2,345	5,91
14,43	70	0	±∞
14,79	80	-2,419	-6,11
14,63	90	-3,012	-4,86

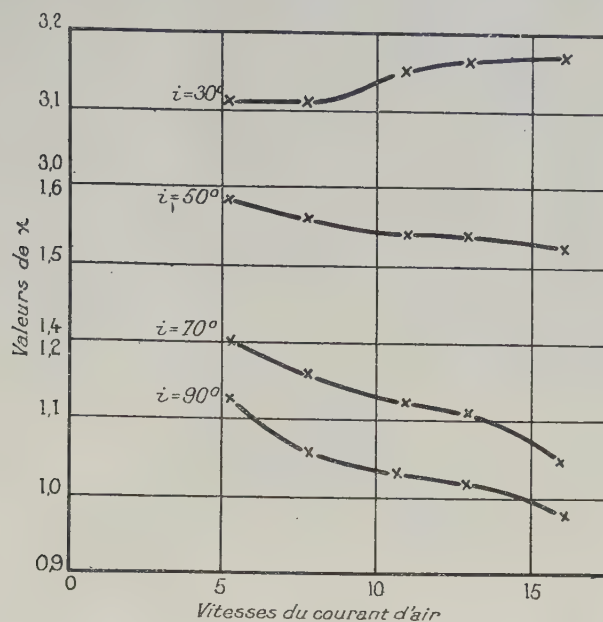
Discussion des résultats expérimentaux.

I. MOULINETS A AXE PARALLÈLE. — Les résultats que nous avons obtenus permettent de répondre à un certain nombre de questions qui ont toutes leur importance au point de vue pratique. La première qui se présente à l'esprit est celle-ci :

Pour une inclinaison donnée du vent par rapport au plan du moulinet, la vitesse de rotation est-elle affectée de la même manière aux différentes vitesses du courant d'air? Autrement dit, la courbe $\frac{V}{n} = f(V)$ conserve-t-elle toujours la même allure quelle que soit l'inclinaison?

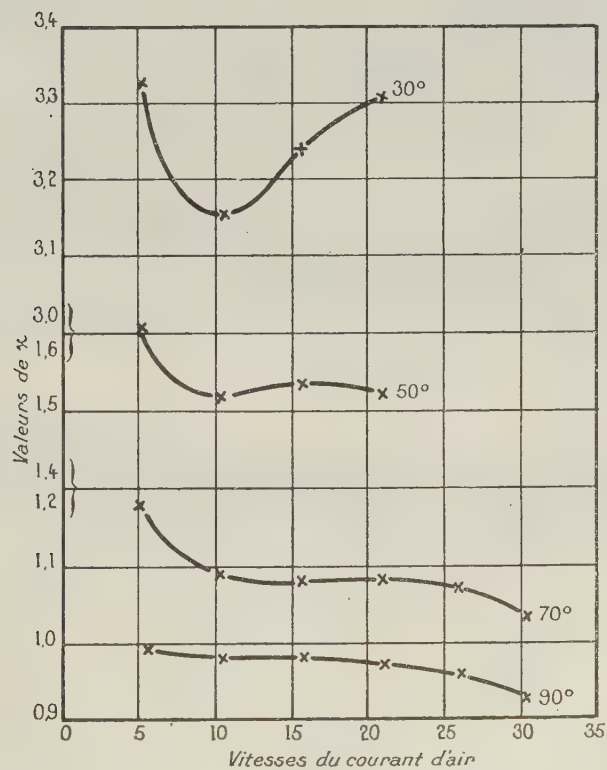
Les graphiques ci-après (fig. 22, 23, 24 et 25) permettent de répondre

Fig. 22.



Variation de z en fonction de V sous diverses incidences. Moulinet A.

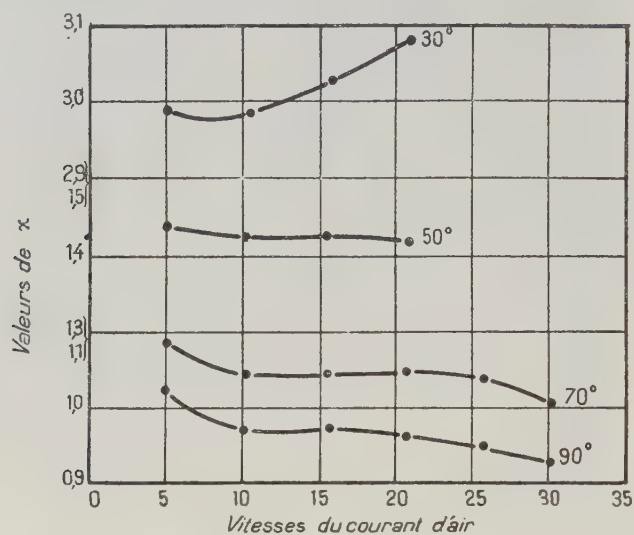
Fig. 23.



Variation de z en fonction de V sous diverses incidences. Moulinet B.

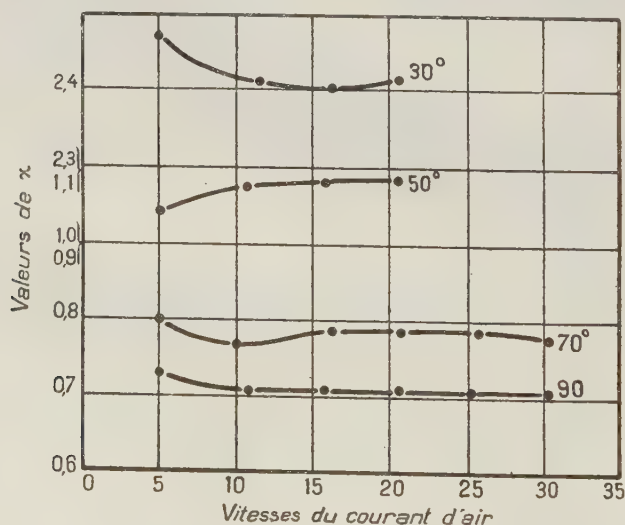
immédiatement à cette question. Ils font voir que si l'inclinaison reste comprise entre 90° (inclinaison correspondant au fonctionnement normal) et 70° ,

Fig. 24.

Variation de x en fonction de V sous diverses incidences. Moulinet C.

on peut pratiquement passer des valeurs de x mesurées sous l'incidence 90° aux valeurs qui correspondent à l'incidence actuelle en multipliant les pre-

Fig. 25.

Variation de x en fonction de V sous diverses incidences. Moulinet D.

mières par un coefficient constant indépendant de la vitesse du vent. Si nous prenons comme valeur de ce coefficient celle qui correspond aux vitesses voisines de 14^m , nous constatons qu'elle est très sensiblement la même pour

les quatre moulinets étudiés comme le montrent les nombres [reproduits ci-dessous :

Moulinet.	α_{90°	α_{70°	V.
A.....	1,01	1,09	12,9
B.....	1,01	1,10	15,5
C.....	1,02	1,08	15,4
D.....	1,02	1,10	16,3
Moyennes.....	1,015	1,093	

Par conséquent, pour les incidences ne s'écartant pas de plus de 20 degrés de celle qui correspond au fonctionnement normal, les vitesses vraies du courant d'air s'obtiendront à l'aide du facteur anémométrique déterminé en position normale à condition de multiplier au préalable les vitesses de rotation observées par un coefficient constant indépendant de la forme des ailettes et de la vitesse du vent et uniquement fonction de l'angle d'inclinaison.

Le moulinet B paraît cependant faire exception à cette règle pour les vitesses inférieures à 10 m : sec.

Quand l'incidence devient notablement inférieure à 70°, on trouve que la forme de la relation qui existe entre α et V se modifie progressivement avec l'inclinaison.

Ces modifications ne sont pas les mêmes pour les divers moulinets et sont affectées par la forme et la surface des ailettes. Cependant, d'une manière générale, pour les vitesses du courant d'air supérieures à 10 m : sec, le facteur anémométrique augmente d'autant plus rapidement à mesure que l'inclinaison se rapproche de 0° que la vitesse du vent est plus grande.

Il suffit pour s'en convaincre de former les rapports $\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$ contenus dans le Tableau suivant et d'examiner leur variation en fonction de i .

RAPPORTS DES VALEURS DU FACTEUR ANÉMOMÉTRIQUE CORRESPONDANT AUX DIVERSES INCLINAISONS
A LA VALEUR QU'IL POSSEDE SOUS L'INCLINAISON DE FONCTIONNEMENT NORMAL
POUR UNE MÊME VITESSE DU VENT.

<i>Moulinet A.</i>					
	V = 5 ^m .2.	7 ^m .7.	10 ^m .8.	12 ^m .9.	16 ^m .
	$\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_{90}}$
$i = 90^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
80	»	»	»	1,01	»
70	1,06	1,10	1,09	1,09	1,07
60	»	»	»	1,23	»
50	1,39	1,47	1,51	1,52	1,56
40	»	»	»	2,06	»
30	2,74	2,94	3,05	3,11	3,24
20	»	»	»	5,03	»
10	»	»	»	16,3	»

Moulinet B.

	V = 5 ^m , 2.	10 ^m , 3.	15 ^m , 5.	20 ^m , 7.	25 ^m , 9.	30 ^m .
	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$
$i = 90^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
80.....	»	»	1,03	»	»	»
70.....	1,18	1,11	1,10	1,12	1,11	1,11
60.....	»	»	1,28	»	»	»
50.....	1,61	1,55	1,56	1,57	»	»
35.....	»	»	2,06	»	»	»
30.....	3,35	3,22	3,30	3,41	»	»
20.....	»	»	6,98	»	»	»
15.....	»	»	∞	»	»	»

Moulinet C.

	V = 5 ^m , 2.	10 ^m , 3.	15 ^m , 5.	20 ^m , 7.	25 ^m , 9.	30 ^m .
	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$
$i = 90^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
80.....	»	»	1,02	»	»	»
70.....	1,06	1,08	1,08	1,09	1,10	1,08
60.....	»	»	1,24	»	»	»
50.....	1,41	1,47	1,47	1,48	»	»
40.....	»	»	2,47	»	»	»
30.....	2,93	3,08	3,14	3,21	»	»
20.....	»	»	6,35	»	»	»
15.....	»	»	∞	»	»	»

Moulinet D.

	V = 5 ^m , 2.	10 ^m , 9.	16 ^m , 2.	20 ^m , 7.
	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$	$\frac{x_i}{x_{90}}$
$i = 90^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00
80.....	»	»	1,02	»
70.....	1,11	1,09	1,11	1,11
60.....	»	»	1,23	»
50.....	1,44	1,52	1,53	1,53
40.....	»	»	2,11	»
30.....	3,41	3,43	3,40	3,41
20.....	»	»	8,88	»
10.....	»	»	∞	»

De ces nombres il résulte que pour les moulinets A, B et C, l'incidence pour laquelle la vitesse de rotation devient nulle doit croître légèrement avec la vitesse du courant dans lequel on expérimente.

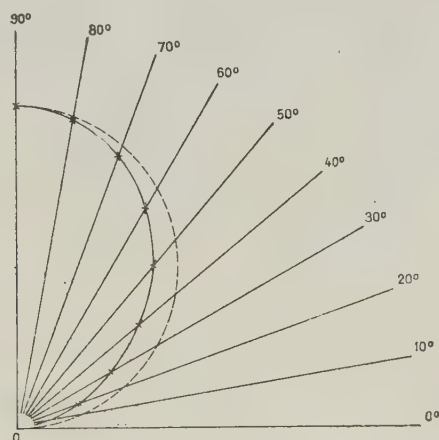
Les résultats expérimentaux montrent en outre que pour deux des moulinets étudiés (A et B) il doit exister au moins une inclinaison pour laquelle la courbe $\frac{V}{n} = F(V)$ se réduit pratiquement à une droite parallèle à l'axe des vitesses, tout au moins dans les limites où les expériences ont été faites. Pour le

moulinet A, l'inclinaison pour laquelle cette condition est réalisée est voisine de 45° ; pour le moulinet C, elle serait voisine de 50° .

Enfin, en comparant les vitesses de rotation mesurées pour les inclinaisons comprises entre 90° et 70° à la composante, $V \sin i$, de la vitesse du vent suivant l'axe du moulinet, on trouve que pour l'incidence 80° le nombre de tours est sensiblement égal à celui qui correspond à $V \sin i$, tandis que, lorsque l'angle formé par les filets d'air avec le plan du moulinet atteint 70° , la vitesse de rotation devient inférieure de 3 pour 100 à celle que l'on calculait d'après la valeur de cette composante.

Une étude plus détaillée de la manière dont varie le facteur anémométrique à vitesse constante en fonction de l'inclinaison montre, *qu'en aucun cas, lorsqu'un courant d'air attaque le plan d'un moulinet à axe parallèle sous un angle inférieur à 75° ou 70° , il n'est légitime d'admettre que la vitesse de rotation de celui-ci est proportionnelle à la composante de la vitesse du vent dirigée suivant son axe* (fig. 26).

Fig. 26.



Variation du facteur anémométrique à vitesse constante en fonction de l'inclinaison du vent. Moulinet A.

Le trait plein correspond aux vitesses de rotation observées dans un courant d'air dont la vitesse était de $12^m, 9$. Le trait pointillé représente celles que l'on aurait observées si la vitesse angulaire du moulinet était proportionnelle à la composante de la vitesse du vent suivant l'axe de l'appareil. Ces quantités sont mesurées par la longueur interceptée sur le rayon vecteur par les courbes correspondantes.

En faisant cette hypothèse, on commet une erreur d'autant plus importante que l'angle d'attaque est plus faible; quand celui-ci tombe au-dessous d'une dizaine de degrés, le moulinet reste immobile pour toutes les vitesses comprises entre 5 et 20 m : sec si les filets composant le courant sont bien parallèles et animés de la même vitesse. Les Tableaux qui suivent permettront de se rendre compte des rapports trouvés expérimentalement entre la composante de la vitesse du vent estimée suivant l'axe du moulinet et la vitesse de rotation correspondante. Les colonnes intitulées i donnent les inclinaisons. Les nombres placés sous la rubrique C_i les valeurs de la composante de la vitesse du vent

suivant l'axe; les colonnes D_i contiennent le rapport $\frac{C_i}{n_i}$. Enfin sous la lettre E_i se trouvent les rapports des nombres D_i au nombre D_{90° .

COMPARAISON DES VITESSES DE ROTATION DES MOULINETS A AXE PARALLÈLE A LA COMPOSANTE DE LA VITESSE DU VENT SUIVANT LEUR AXE POUR DIVERSES INCLINAISONS DU VENT.

<i>Moulinet A.</i>				<i>Moulinet B.</i>			
$i.$	C_i	D_i	E_i	$i.$	C_i	D_i	E_i
90°.....	12,89	1,02	1,00	90°.....	15,51	0,98	1,00
80.....	12,70	1,02	1,00	80.....	15,28	0,99	1,01
70.....	12,12	1,04	1,03	70.....	14,58	1,01	1,04
60.....	11,16	1,08	1,07	60.....	13,43	1,08	1,11
50.....	9,87	1,18	1,16	50.....	11,88	1,17	1,20
40.....	8,29	1,34	1,32	40.....	9,97	1,30	1,32
30.....	6,45	1,58	1,55	30.....	7,76	1,62	1,65
20.....	4,41	1,75	1,72	20.....	5,30	2,04	2,09
10.....	2,24	2,89	2,85				

<i>Moulinet C.</i>				<i>Moulinet D.</i>			
$i.$	C_i	D_i	E_i	$i.$	C_i	D_i	E_i
90°.....	15,44	0,96	1,00	90°.....	16,25	0,71	1,00
80.....	15,21	0,97	1,01	80.....	16,01	0,71	1,00
70.....	14,51	0,98	1,02	70.....	15,28	0,73	1,03
60.....	13,37	1,04	1,08	60.....	14,07	0,75	1,06
50.....	11,83	1,09	1,13	50.....	12,45	0,82	1,15
35.....	8,86	1,37	1,42	40.....	10,45	0,96	1,36
30.....	7,72	1,53	1,58	30.....	8,13	1,22	1,72
20.....	5,28	2,09	2,17	20.....	5,56	2,16	3,04

De nos expériences ressortent donc les faits suivants :

1^o La variation du facteur anémométrique d'un moulinet à axe parallèle en fonction de la vitesse du vent n'est pas indépendante de l'inclinaison des filets d'air sur son plan;

2^o Pour une vitesse donnée du vent, la vitesse de rotation de ce genre de moulinets décroît avec l'incidence, mais suivant une loi beaucoup plus rapide que celle suivant laquelle diminue la composante de la vitesse du vent parallèle à leur axe;

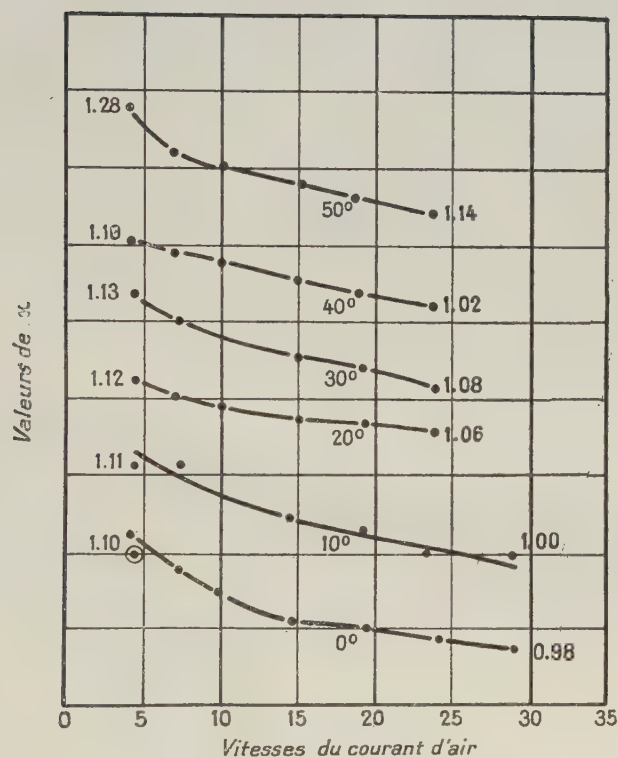
3^o Pour les incidences très faibles comprises entre 0° et 10° ou 15°, des courants d'air réguliers de vitesse comprise entre 5 et 20 m : sec se sont montrés insuffisants pour provoquer la rotation des moulinets étudiés.

Il résulte de cette discussion que tout anémomètre à axe parallèle installé dans des conditions favorisant la formation de remous à composante verticale accentuée ne peut donner la composante horizontale de la vitesse du vent et que les nombres recueillis dans de telles conditions pourront être notablement inférieurs à la valeur réelle de la quantité que l'on veut déterminer.

Nous n'insisterons pas pour l'instant sur les conséquences qui découlent de nos recherches au point de vue de la mesure de la composante verticale de la vitesse du vent à l'aide des appareils à rotation. Nous reviendrons sur ce sujet dans un Chapitre spécial après avoir étudié les résultats que nous a fournis l'étude des moulinets à axe perpendiculaire.

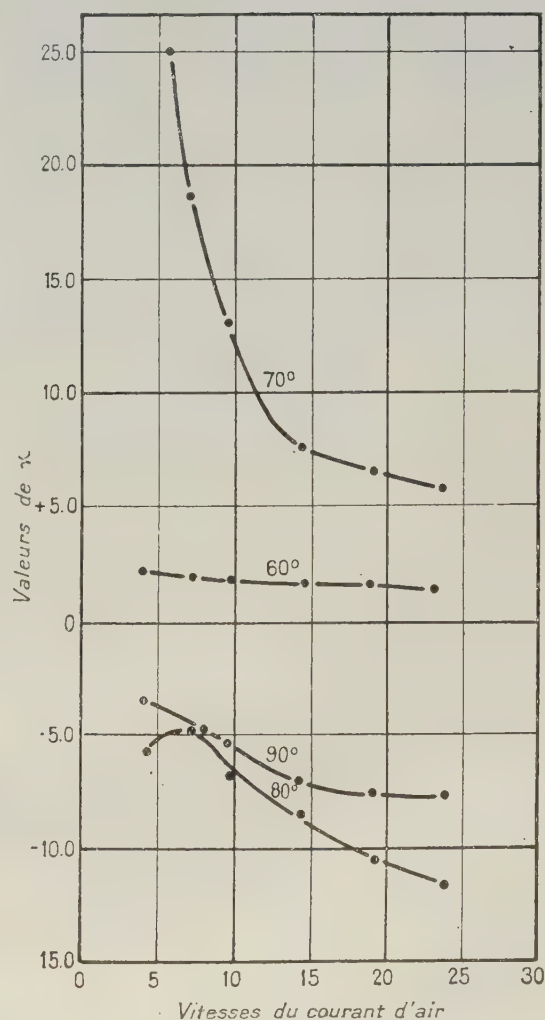
II. MOULINETS A AXE PERPENDICULAIRE. — *a. Moulinets Robinson.* — Le procédé qui nous a paru le plus commode pour étudier les variations du facteur anémométrique en fonction de l'inclinaison (voir *fig. 27*) est celui que nous avons

Fig. 27.



Inclinaisons comprises entre 0° et 50°.

Moulinet H₁. Variation de x en fonction de la vitesse et de l'inclinaison du vent.



Inclinaisons comprises entre 60° et 90°.

déjà utilisé dans le paragraphe précédent et qui consiste à calculer les rapports $\frac{x_i}{x_{90^\circ}}$ pour des valeurs déterminées de la vitesse du courant d'air.

Comme, sous les diverses inclinaisons, nos expériences ont été faites en utilisant des courants dont les vitesses étaient sensiblement réparties suivant la même progression, les nombres obtenus pour les valeurs de α_i aux divers angles d'attaque sont très sensiblement comparables et l'on peut adopter comme vitesse du vent correspondante la moyenne des vitesses mesurées sous chaque incidence. Par exemple, pour le moulinet E, on a fait cinq séries de mesures pour les inclinaisons 0° , 20° , 40° , 60° , 90° dans des courants dont les vitesses respectives étaient $9^m,23$, $9^m,14$, $9^m,23$, $9^m,03$, $9^m,13$; nous pouvons admettre sans grande erreur que ces cinq courants avaient tous la même vitesse égale à leur moyenne, soit $9^m,15$. C'est en adoptant cette manière de voir que les nombres contenus dans les Tableaux suivants ont été calculés.

MOULINETS ROBINSON.

Valeur de $\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$ pour les diverses vitesses du vent.

Moulinet E.

	$V = 4^m,4.$	$9^m,2.$	$14^m,7.$	$19^m,8.$	$25^m,1.$	$30^m,2.$
	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	»	»	1,04	»	»	»
20	0,96	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
30	»	»	0,95	»	»	»
40	1,00	1,01	0,98	1,01	1,02	»
50	»	»	1,21	»	»	»
60	2,05	2,03	1,81	1,71	1,67	»
70	»	»	»	»	»	»
80	»	»	—4,71	»	»	»
90	—2,38	—2,79	—3,96	—4,40	»	»

Moulinet F.

$V = 11^m,8.$	$V = 14^m,8.$
$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$
$i = 0^\circ$	1,00
15.....	1,02
30.....	0,96
45.....	1,06
$i = 60^\circ$	1,78
75.....	—10,95
90.....	—4,42

Moulinet G.

	$V = 9^m,2.$	$15^m,2.$	$20^m,2.$	$25^m,2.$	$30^m,5.$
	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$	$\frac{\alpha_i}{\alpha_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	»	1,03	»	»	»
20	1,00	1,01	0,95	1,01	1,00
30	»	0,98	»	»	»
40	0,98	0,99	0,96	1,02	0,99
50	»	1,23	»	»	»
60	1,91	1,89	1,68	1,70	1,60
70	»	$\pm\infty$	»	»	»
80	»	—4,62	»	»	»
90	»	—3,84	»	»	»

Moulinet H.

 V = 14^m, 6.

 V = 14^m, 6.

	$\frac{x_i}{x_0}$		$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	$i = 45^\circ$	1,02
15.....	1,01	60.....	1,85
30.....	0,95	90.....	-4,09

 Moulinet H₁.

	V = 4 ^m , 3.	7 ^m , 1.	9 ^m , 9.	14 ^m , 7.	19 ^m , 1.	23 ^m , 8.	28 ^m , 6.
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10.....	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,01	1,02
20.....	1,02	1,02	1,03	1,06	1,07	1,07	»
30.....	1,03	1,02	1,02	1,04	1,04	1,02	»
40.....	1,00	1,01	1,02	1,04	1,05	1,03	»
50.....	1,17	1,13	1,14	1,17	1,17	1,15	»
60.....	1,91	1,78	1,71	1,59	1,49	1,44	»
70.....	»	17,20	12,49	6,34	6,42	5,86	»
80.....	-5,42	-4,50	-6,55	-8,48	-10,60	-11,78	»
90.....	-3,17	-4,40	-5,05	-6,77	-7,42	-7,79	»

Moulinet I.

	V = 4 ^m , 9.	9 ^m , 3.	15 ^m , 1.	20 ^m , 1.	25 ^m , 3.	30 ^m , 4.
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10.....	»	»	1,07	»	»	»
20.....	1,10	1,17	1,12	1,11	1,09	1,09
30.....	»	»	1,15	»	»	»
40.....	1,18	1,16	1,12	1,13	1,07	1,07
50.....	»	»	1,11	»	»	»
60.....	1,54	1,35	1,22	1,17	1,10	1,09
70.....	»	»	1,65	»	»	»
80.....	»	»	»	»	»	»
90.....	»	»	»	»	»	»

Moulinet J.

 V = 15^m.

	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00
15.....	1,01
30.....	0,96
45.....	1,10
60.....	1,86
75.....	-12,26
90.....	-4,51

Moulinet K.

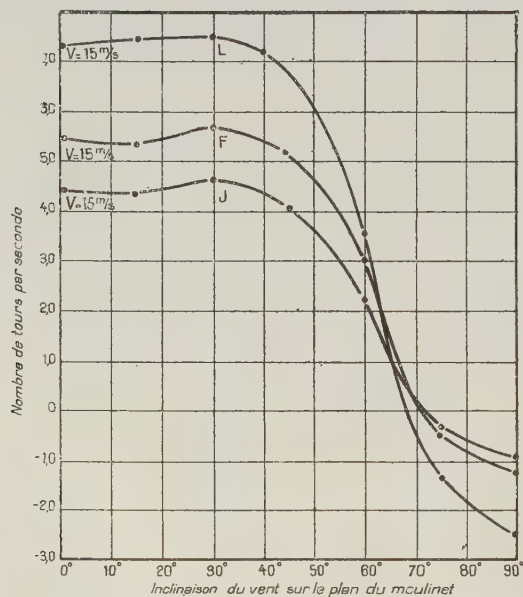
 V = 14^m, 9.

	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00
15.....	1,02
30.....	0,98
45.....	1,09
60.....	1,83
75.....	-7,48
90.....	-3,59

Moulinet M.

	$V = 4^m, 3.$	$9^m, 3.$	$15^m.$	$20^m, 2.$
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00
10	»	»	1,05	»
20	1,03	1,05	1,09	1,06
30	»	»	1,08	»
40	1,20	1,14	1,12	1,18
50	»	»	1,40	»
60	2,99	2,27	1,91	2,25
75	»	»	-8,17	»
82,5	»	»	-3,22	»
90	»	»	-3,00	»

Fig. 28.

Variation de la vitesse de rotation en fonction de l'incidence à vitesse constante du courant d'air.
Moulinets J, F, L.*Moulinet L.*

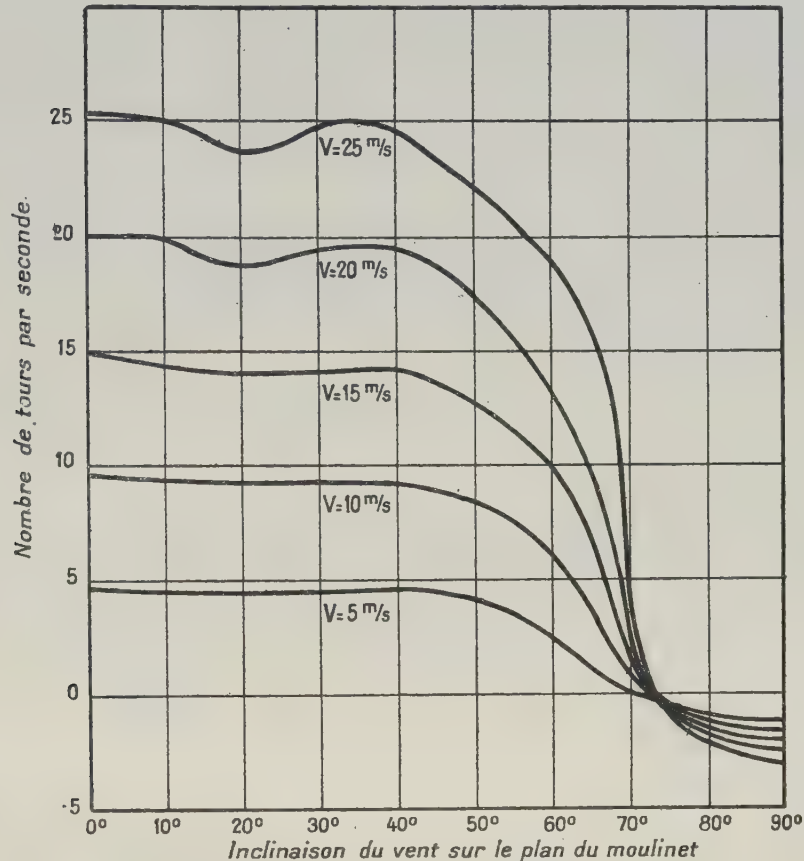
$V = 14^m, 8.$	$V = 14^m, 8.$
$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	$i = 60^\circ$
15	75
30	90
40	
1,00	2,09
0,99	-5,44
0,98	-2,99
1,02	

Tant que l'inclinaison reste comprise entre 0° et 30° , on remarque que, pour tous les moulinets Robinson sur lesquels ont porté les expériences, l'allure des courbes représentant les variations de x en fonction de V n'est guère modifiée.

On peut pratiquement admettre que, dans ces limites et pour un moulinet donné, on obtient les valeurs de α_i correspondant à une vitesse quelconque du courant d'air, en multipliant la valeur trouvée pour α à la même vitesse sous l'incidence 0° par un coefficient approprié dépendant uniquement de l'inclinaison.

Fig. 29.

Moulinets à axe perpendiculaire.



Variation de l'inclinaison d'arrêt avec la vitesse du vent, Moulinet II₁.

La valeur de ce coefficient est influencée par le rapport de la longueur des bras au diamètre des coupes. En étudiant la famille constituée par les moulinets E, F, G, H, H₁, I, on s'aperçoit que pour ceux de ces organes, E, F, G, H, dont le diamètre est supérieur à 2,5 fois le diamètre des coupes, le facteur anémométrique, qui commence d'abord par croître légèrement avec l'inclinaison du courant par rapport à leur plan, décroît ensuite pour passer par un minimum inférieur à α_0 pour une incidence comprise entre 30° et 40° , puis croît de nouveau jusqu'à ce que celle-ci atteigne une valeur comprise entre 70° et 75° . A ce moment, la vitesse de rotation s'annule et α devient infini. Pour des valeurs de l'incidence

supérieures à 75° , la rotation change de sens; α_i est négatif et décroît en valeur absolue à mesure que l'on se rapproche de l'inclinaison 90° .

Les moulinets dont le diamètre est égal ou inférieur au double du diamètre des coupes (H_1 et I) offrent des phénomènes analogues. On constate entre 30° et 40° un minimum relatif de α_i , mais ce minimum reste notablement supérieur à α_0 et pour une même vitesse du vent il se produit sous une incidence plus grande que pour les moulinets à longs bras. L'inclinaison pour laquelle, à une vitesse donnée du courant d'air, la vitesse de rotation s'annule, se rapproche davantage de 90° . A 15 m : sec, elle est de 75° pour le moulinet H_1 et de 80° pour le moulinet I. En outre, avec le moulinet I, il a été impossible d'obtenir le renversement du sens de la rotation constaté avec les autres instruments de la même famille. Bien plus, sous l'incidence 90° , j'ai pu le faire tourner dans le sens direct en augmentant suffisamment la vitesse du courant d'air.

L'examen des résultats obtenus avec les moulinets H_1 et I mène aux conclusions suivantes que l'expérience m'a permis de vérifier directement.

Pour un moulinet Robinson donné :

1^o L'inclinaison correspondant à la vitesse de rotation nulle (*inclinaison d'arrêt ou incidence critique*) est d'autant plus grande que la vitesse du vent est plus élevée;

2^o Il est possible de trouver une inclinaison pour laquelle le sens de la rotation change avec la vitesse du vent.

Voici les résultats fournis par le moulinet T en ce qui concerne la première conclusion :

Vitesse du courant d'air.	Inclinaison correspondant à la vitesse de rotation nulle.
^m 4,0.....	^o 71
9,4.....	75
14,2.....	76.30'
19,1.....	77.30

La seconde a été vérifiée avec le moulinet H_1 .

Sous l'inclinaison 75° , on a trouvé pour ce moulinet les résultats ci-dessous :

V.	$\frac{V}{n}$.
9,79.....	-15,92
14,67.....	-39,86
15,63.....	∞
31,13.....	-58,52

L'étude des moulinets à axe parallèle nous a montré que leur vitesse de rota-

tion dans un courant d'air de vitesse donnée ne varie pas comme la composante de la vitesse du vent parallèle à leur axe. Dans les moulinets à axe perpendiculaire, la vitesse de rotation n'est pas davantage proportionnelle à la composante de la vitesse du vent perpendiculaire à leur axe. Les Tableaux ci-dessous permettront de s'en convaincre. Dans la première colonne i sont inscrites les inclinaisons, dans la seconde C_i les valeurs de la composante du vent perpendiculaire à l'axe du moulinet, dans la troisième D_i les rapports de cette composante à la vitesse de rotation exprimée en tours par seconde, enfin dans la quatrième E_i on a rassemblé les quotients des nombres D_i par le nombre D_{0° correspondant à l'incidence 0° .

COMPARAISON DES VITESSES DE ROTATIONS DE QUELQUES MOULINETS ROBINSON A LA COMPOSANTE DE LA VITESSE DU VENT PERPENDICULAIRE A LEUR AXE POUR DIVERSES INCLINAISONS DU VENT.

<i>Moulinet E.</i>				<i>Moulinet G.</i>			
i .	C_i .	D_i .	E_i .	i .	C_i .	D_i .	E_i .
0°	14,71	3,52	1,00	0°	15,56	2,02	1,00
10.....	14,69	3,59	1,02	10.....	15,07	2,05	1,01
20.....	13,91	3,29	0,94	20.....	14,36	1,91	0,95
30.....	12,67	2,88	0,82	30.....	13,29	1,73	0,85
40.....	11,31	2,65	0,75	40.....	11,93	1,54	0,76
50.....	9,40	2,74	0,78	50.....	9,94	1,50	0,79
60.....	7,47	3,18	0,90	60.....	7,11	1,91	0,94
70.....	5,03	∞	∞	70.....	4,96	∞	∞

<i>Moulinet H₁.</i>				<i>Moulinet I.</i>			
i .	C_i .	D_i .	E_i .	i .	C_i .	D_i .	E_i .
0°	14,60	1,01	1,00	0°	14,77	0,68	1,00
10.....	14,40	1,03	1,02	10.....	14,71	0,72	1,06
20.....	13,93	1,01	1,00	20.....	14,13	0,71	1,05
30.....	12,90	0,91	0,90	30.....	13,12	0,68	1,00
40.....	11,46	0,81	0,80	40.....	11,54	0,58	0,86
50.....	9,77	0,76	0,75	50.....	9,71	0,48	0,71
60.....	7,30	0,80	0,80	60.....	7,63	0,41	0,61
70.....	4,99	2,69	2,66	70.....	5,17	0,38	0,56

En confrontant ces résultats avec ceux qui ont été obtenus pour les moulinets à axe parallèle (*voir* p. 83), on est immédiatement fixé sur la valeur de comparaisons faites à l'air libre entre des anémomètres munis de moulinets à axe parallèle et des anémomètres à coupes hémisphériques, quand on ne dispose d'aucun moyen expérimental de s'assurer que le vent est resté horizontal pendant toute la durée des comparaisons. Si nous supposons par exemple que l'on compare deux anémomètres, l'un muni du moulinet H₁, l'autre du moulinet B, les mesures fourniront comme valeur du rapport de la vitesse de rotation de B à celle de H₁ (si la vitesse du vent est de 15 m : sec) des nombres compris entre 1,03 (vent horizontal) et 0,68 (vent incliné de 40° sur l'horizon). Les

comparaisons dans le vent naturel faites entre des anémomètres à moulinet Robinson peuvent cependant fournir de meilleurs résultats surtout si elles portent sur des instruments de dimensions et de constructions peu différentes.

En résumé, les principales conclusions que l'on est en droit de tirer des expériences faites sur le fonctionnement des moulinets Robinson dans des courants d'air inclinés par rapport à leur plan sont les suivantes :

1° A vitesse constante du courant d'air la vitesse de rotation des moulinets Robinson passe par deux maxima, l'un correspondant à l'inclinaison 0° , l'autre à une inclinaison comprise entre 30° et 40° . Suivant que le moulinet a un diamètre supérieur à 2,5 fois le diamètre d'une coupe ou inférieur à 2 fois ce dernier, le maximum absolu de la vitesse de rotation correspond à la *seconde ou à la première* valeur de l'inclinaison.

2° Pour tous les moulinets à coupes hémisphériques expérimentés la vitesse de rotation s'annule dans des courants d'air dont la vitesse est inférieure à 20 m : sec lorsque l'inclinaison atteint une valeur comprise entre 70° et 85° . L'inclinaison d'arrêt se rapproche d'autant plus de 90° que le moulinet est pourvu de bras plus courts et que la vitesse du courant d'air est plus élevée. Pour un moulinet donné, c'est surtout aux faibles vitesses que la variation de l'inclinaison d'arrêt en fonction de la vitesse du courant d'air est le plus accusée.

3° Si, pour une vitesse donnée du courant d'air, l'inclinaison prend des valeurs supérieures à celle qui correspond à l'arrêt du moulinet, celui-ci se met à tourner en sens inverse et d'autant plus rapidement que l'on se rapproche davantage de l'inclinaison 90° . Le moulinet I fait seule exception à cette règle. Sous l'incidence 90° , il reste immobile tant que la vitesse du courant d'air est inférieure à 25^m . Pour les vitesses supérieures, il se met à tourner dans le sens direct.

4° Il n'y a pas de relation simple entre la vitesse de rotation des moulinets Robinson placés dans un courant d'air incliné et la composante de la vitesse du vent perpendiculaire à leur axe. Cette relation se modifie d'ailleurs en même temps que le rapport entre les dimensions des organes constituant le moulinet.

5° La variation du facteur anémométrique en fonction de la vitesse du vent paraît obéir à une loi analogue à celle qui la régit sous l'incidence 0° tant que l'inclinaison du courant d'air par rapport au plan du moulinet ne dépasse pas 40° pour les moulinets à longs bras et 30° pour les moulinets à courts bras. Pour des inclinaisons supérieures à ces valeurs, la décroissance de α en fonction de V devient d'autant plus accentuée que l'on se rapproche davantage de l'inclinaison d'arrêt.

b. Moulinets à ailettes hémicylindriques. — Les Tableaux ci-après donnent

les valeurs de $\frac{x_i}{x_0}$ pour les trois moulinets à hémicylindres qui ont été essayés systématiquement.

MOULINETS A AILETTES HÉMICYLINDRIQUES PERPENDICULAIRES.

Moulinet N.

	V = 5 ^m , 2.	10 ^m , 5.	15 ^m , 6.	20 ^m , 6.
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00
10.....	»	»	1,07	»
20.....	0,94	0,97	0,95	0,99
30.....	»	»	1,00	»
40.....	1,03	1,18	1,24	1,31
50.....	»	»	1,62	»
60.....	2,16	2,52	2,63	2,90

Moulinet O.

	V = 4 ^m , 5.	9 ^m , 3.	15 ^m , 0.	20 ^m , 1.	25 ^m , 1.
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10.....	»	»	1,00	»	»
20.....	0,90	0,93	0,94	0,94	0,96
30.....	»	»	0,92	»	»
40.....	0,99	1,02	1,09	1,14	»
50.....	»	»	1,51	»	»
60.....	1,90	1,92	2,05	2,21	»
70.....	»	»	8,72	»	»

MOULINET A AILETTES HÉMICYLINDRIQUES RADIALES.

Moulinet P.

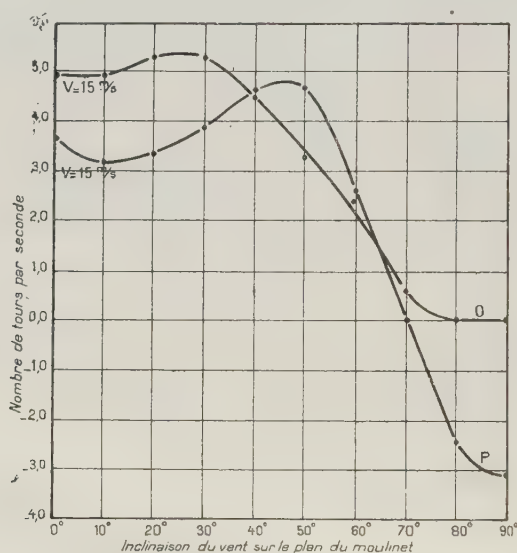
	V = 8 ^m , 8.	14 ^m , 5.	19 ^m , 4.
	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$	$\frac{x_i}{x_0}$
$i = 0^\circ$	1,00	1,00	1,00
10.....	»	1,18	»
20.....	1,11	1,11	1,10
30.....	»	0,97	»
40.....	0,81	0,81	0,81
50.....	»	0,80	»
60.....	1,54	1,46	1,50
70.....	∞	∞	∞
80.....	—1,49	—1,52	—1,51
90.....	—1,16	—1,20	—1,23

Dans les moulinets à ailettes hémicylindriques perpendiculaires, la forme de la relation $\frac{V}{n} = f(V)$ est déjà modifiée quand l'incidence atteint 20° , tandis que pour le moulinet P, dans lequel les hémicylindres sont disposés radialement, on peut admettre que jusqu'à 60° les variations de l'incidence ne paraissent

pas affecter la forme de la relation existant entre le facteur anémométrique et la vitesse du vent.

Nous avons vu que le facteur anémométrique des moulinets Robinson lorsque l'inclinaison atteint 60° , décroît beaucoup plus rapidement que sous l'incidence 0° quand la vitesse du vent augmente. Avec les moulinets à ailettes hémicylindriques perpendiculaires, on constate au contraire que le facteur anémométrique sous l'incidence de 60° décroît plutôt moins rapidement quand V augmente qu'il ne le fait sous l'incidence 0° . Autrement dit, *la diminution de la vitesse de rotation à mesure que l'incidence augmente est plus sensible pour les fortes vitesses que pour les faibles*, phénomène inverse de celui que l'on constate avec les moulinets Robinson.

Fig. 30.



Variation de la vitesse de rotation en fonction de l'incidence à vitesse constante du courant d'air.
Moulinets à ailettes hémicylindriques.

Les moulinets à hémicylindres perpendiculaires ont tendance à s'arrêter quand l'inclinaison atteint 70° . A 16 m : sec, le moulinet N reste immobile sous l'incidence 70° . Pour les incidences supérieures à cette valeur, il tourne lentement dans le sens inverse. Pour le moulinet O on n'a pu trouver de position d'arrêt. A partir de 80° la vitesse de rotation devient très faible et continue à être positive jusqu'à l'incidence 90° . Il suffit en effet d'une très légère imperfection dans le réglage des ailettes pour déterminer la rotation sous cette incidence. En inclinant légèrement l'une d'entre elles par rapport au plan du moulinet, on peut à volonté faire changer le sens de la rotation aux inclinaisons comprises entre 75° et 90° .

Si l'on ajoute des demi-bases aux extrémités des hémicylindres disposés perpendiculairement aux bras, on trouve une position d'arrêt bien déterminée.

Pour des inclinaisons inférieures à l'angle d'arrêt, la vitesse de rotation est positive; pour les inclinaisons supérieures à cette valeur, la rotation se fait en sens inverse.

L'inclinaison d'arrêt paraît être indépendante de la vitesse du courant d'air. Voici d'ailleurs les résultats que nous a donnés le moulinet Q :

<i>Moulinet Q.</i>			
$i.$	V.	$n.$	$\alpha.$
0°.....	14,27	2,586	5,52
20.....	14,39	2,609	5,52
30.....	14,48	1,712	8,46
60.....	14,55	0,691	21,06
80.....	15,31	-0,168	-91,02
90.....	14,09	-0,163	-9,22

Aux vitesses 13^m,6, 18^m,6 et 23^m,6, l'inclinaison d'arrêt a été trouvée égale à 78°.

Le moulinet P a une position d'arrêt très nette correspondant à l'incidence 70°. Pour les incidences inférieures à cette valeur, la rotation a lieu dans le sens inverse. L'angle d'arrêt paraît indépendant de la vitesse du courant d'air.

En somme, les moulinets Robinson se trouvent placés, au point de vue de l'influence de l'inclinaison du courant d'air, entre les moulinets à hémicylindres perpendiculaires et les moulinets à hémicylindres parallèles.

Certains expérimentateurs, soupçonnant, à juste titre d'ailleurs, que les moulinets à coupes hémisphériques ne donnaient pas la vraie valeur de la composante horizontale de la vitesse du vent, ont cru réaliser un moulinet dont les indications seraient exactement proportionnelles à cette dernière quantité en remplaçant les hémisphères par des hémicylindres perpendiculaires aux bras. L'expérience montre que cette transformation ne permet pas d'atteindre le but qu'ils se proposaient. Pas plus que pour les moulinets Robinson, la vitesse de rotation des moulinets à ailettes hémicylindriques placés dans un courant d'air incliné n'est proportionnelle à la composante de la vitesse du courant perpendiculaire à leur axe. Les Tableaux ci-dessous, établis sur le même modèle que ceux que nous avons donnés plus haut, le mettent très nettement en évidence.

<i>Moulinet N.</i>				<i>Moulinet O.</i>			
$i.$	C_p	D_p	E_p	$i.$	C_p	D_p	E_p
0°.....	15,44	4,14	1,00	0°.....	14,95	3,05	1,00
10.....	15,21	4,15	1,00	10.....	14,76	3,00	0,98
20.....	14,56	3,71	0,90	20.....	14,30	2,70	0,88
30.....	13,37	3,60	0,87	30.....	12,57	2,44	0,80
40.....	11,83	3,93	0,95	40.....	11,46	2,56	0,84
50.....	10,49	4,33	1,04	50.....	9,65	2,96	0,97
60.....	7,72	5,45	1,32	60.....	7,60	3,15	1,03
70.....	5,61	{ rotation lente / sens direct }		70.....	5,21	9,10	2,98

Moulinet P.

$i.$	$C_i.$	$D_i.$	$E_i.$
0°.....	14,70	4,03	1,00
10°.....	14,43	4,68	1,16
20.....	13,52	4,19	1,04
30.....	12,41	3,38	0,84
40.....	11,05	2,51	0,61
50.....	9,29	2,06	0,51
60.....	7,19	3,07	0,76
70.....	4,94	∞	∞

Pour terminer, nous signalerons les résultats de quelques expériences faites sur le moulinet V.

Cet instrument a été essayé sous l'incidence 0° et sous l'incidence 90°, l'axe étant placé horizontalement. Sous l'incidence 0° dans un courant d'air de 6^m,03, le rapport $\frac{V}{n}$ a été trouvé égal à 14,36; dans un courant d'air de 10^m,05, il n'était plus que 7,06. Sous l'incidence 90° la rotation a lieu en sens inverse et à 6^m,82 le rapport $\frac{V}{n}$ est 6,65. Cet instrument tourne donc, aux faibles vitesses tout au moins, plus rapidement quand l'incidence est 90° que lorsque celle-ci est 0°. La position d'arrêt est fort variable avec la vitesse du vent. On a trouvé comme inclinaison du courant d'air correspondant à cette position les valeurs suivantes :

Vitesse du courant d'air.	Inclinaison d'arrêt.
5,6.....	54°
9,4.....	62
11,1.....	65
19,1.....	67
27,4.....	67

Comme pour les moulinets Robinson, l'inclinaison d'arrêt se rapproche d'autant plus de 90° que la vitesse du vent est plus grande et la variation de cette inclinaison en fonction de la vitesse est surtout accusée aux faibles vitesses du courant d'air.

CHAPITRE V.

SUR LA MESURE DE L'INCLINAISON DU VENT A L'AIDE DES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

Historique. — Nous sommes maintenant en mesure de nous rendre compte de la valeur des mesures de l'inclinaison du vent et de la composante verticale de cet élément réalisées au moyen des moulinets anémométriques. Comme nous

avons laissé de côté, dans la première Partie, les instruments imaginés en vue d'obtenir ces données, nous rappellerons d'abord brièvement l'historique de la question.

Le premier instrument construit en vue de mesurer l'inclinaison du vent est celui de Dalberg qui remonte à 1780. En 1801, Benzenberg proposa d'utiliser dans ce but une girouette à axe horizontal orientée par l'intermédiaire d'une autre girouette à axe vertical. Mais les premières mesures suivies de l'inclinaison du vent sont dues à Cacciatore, directeur de l'Observatoire de Palerme ⁽¹⁾.

Le dispositif dont il s'est servi tout d'abord comportait deux moulinets actionnant chacun un compteur de tours, et munis de quatre palettes incurvées constituées par des portions de cylindres. L'un de ces moulinets avait son axe placé verticalement, l'autre était disposé de manière que son axe fût horizontal et orienté par une girouette de manière à se trouver dans le plan vertical mené par la direction du vent. Si l'on admet que la vitesse de rotation des moulinets employés est proportionnelle à la composante de la vitesse du vent perpendiculaire à leur axe, le premier donne la composante horizontale, le second la composante verticale sans toutefois indiquer si elle est ascendante ou descendante et l'on peut déterminer l'inclinaison moyenne du vent sur l'horizon par la formule simple $\frac{\varphi}{\psi} = \tan i$, si l'on représente par φ la composante horizontale et par ψ la composante verticale. Après avoir fonctionné de 1840 à 1878 environ, ce dispositif fut mis hors d'usage par une violente tempête et les moulinets primitifs furent remplacés par des moulinets Robinson.

A la suite du Congrès météorologique international tenu à Rome en avril 1879, le P. Marc Dechevrens, alors directeur de l'Observatoire de Zi-Ka-Wei, se préoccupa d'établir un instrument capable de donner l'inclinaison du vent sur l'horizon. Il crut tout d'abord avoir trouvé la solution du problème par l'emploi d'une girouette à axe horizontal, aussi bien équilibrée que possible et orientée par une girouette ordinaire de manière que son axe fût toujours perpendiculaire à la direction du vent ⁽²⁾. Malheureusement, on fut rapidement obligé de renoncer à son emploi, l'équilibre étant détruit par les précipitations, pluie, neige, rosée, etc.

Quelques années plus tard, Garrigou-Lagrange décrivait un système de girouette différent, capable d'indiquer si le vent était ascendant ou descendant ⁽³⁾.

Ayant bientôt reconnu les inconvénients de ce dispositif, il eut l'idée de

⁽¹⁾ *Annuario della Società Meteorologica italiana*, t. I, 1878, p. 201.

⁽²⁾ P. Marc DECHEVRENS, *Sur l'inclinaison des vents, nouvelle girouette pour observer cette inclinaison* (Zi-Ka-Wei, 1881).

⁽³⁾ GARRIGOU-LAGRANGE, *Note sur la girouette verticale et sur les courants ascendants de l'air* (*Ann. Soc. Mété. de France*, t. XXXIII, 1885, p. 185).

recourir, pour déceler les courants ascendants et descendants, à l'emploi d'un moulinet à « ailettes planes formant hélice » placé sur un axe vertical. Mais ce n'est que l'année suivante qu'il put réaliser le dispositif lui permettant d'enregistrer les mouvements de rotation tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire, que prend le moulinet suivant que le vent est ascendant ou descendant. Entre temps il s'était servi pour enregistrer les mouvements verticaux de l'air d'une plaque de pression disposée horizontalement ⁽¹⁾.

Cependant le P. Dechevrens poursuivait ses recherches et arrêta son choix pour la mesure de l'inclinaison du vent sur le moulinet à axe vertical et à palettes planes inclinées à 45° auquel il donna le nom de *clino-anémomètre* ⁽²⁾.

On pensait couramment à cette époque que la pression du vent sur une surface plane inclinée était proportionnelle au carré de la composante du vent normale à cette surface. Il se crut donc autorisé à admettre que la vitesse de rotation de son moulinet était proportionnelle à la composante de la vitesse du vent parallèle à son axe, le sens de la rotation étant fonction du signe de l'inclinaison. Il suffisait alors pour connaître l'inclinaison du vent d'enregistrer d'une part la composante horizontale de la vitesse, et d'autre part la vitesse de rotation du clino-anémomètre et son signe après avoir déterminé sous l'incidence 90° le facteur anémométrique de ce dernier. On obtenait ainsi les éléments nécessaires au calcul de l'inclinaison, la composante horizontale v et la composante verticale w de la vitesse du vent. L'inclinaison s'en déduisait immédiatement par la formule $\tan i = \frac{w}{v}$.

Dès 1887, le P. Dechevrens publiait les résultats de la première année d'observations et constatait une prédominance très nette des courants ascendants sur les courants descendants. L'emploi de la girouette d'inclinaison l'avait précédemment conduit à un résultat analogue ⁽³⁾.

Des observations entreprises à l'aide du clino-anémomètre plus ou moins modifié à Manille, à Blue-Hill, à Odessa, à Lyon, au sommet de la tour Eiffel et à Jersey ont conduit à la même constatation. Partout, d'après les mesures faites à l'aide de cet instrument, l'air au lieu de s'écouler horizontalement aurait en moyenne et dans tous les mois de l'année une inclinaison positive et serait animé d'une vitesse dont la composante dirigée de bas en haut est loin d'être négligeable. A Jersey, par exemple, elle serait en moyenne annuelle de 0^m,7 par seconde ⁽⁴⁾.

Ce résultat paradoxal, dont aucune explication plausible ne paraît avoir été

(1) *Ann. Soc. Mët. de France*, t. XXXIV, 1886, p. 50, et t. XXXV, 1887, p. 124.

(2) P. Marc DECHEVRENS, *L'inclinaison des vents*, deuxième Note (Zi-Ka-Wei, 1886).

(3) *L'inclinaison de vents sur l'horizon*, troisième Note (Zi-Ka-Wei, 1887).

(4) P. Marc DECHEVRENS, *L'inclinaison du vent sur l'horizon* (Rome, 1906).

donnée jusqu'à présent, découragea la plupart des chercheurs et les observations furent interrompues partout sauf à Jersey où le P. Dechevrens les a poursuivies avec une persévérance inlassable.

Les expériences discutées ci-dessus et le fait bien connu de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur au-dessus du sol permettent de jeter quelque lumière sur cette question.

Nous avons vu que le vent naturel n'est pas constitué par un courant formé de filets parallèles animés tous d'une même vitesse uniforme. L'observation du clino-anémomètre montre que souvent les rotations positives succèdent très rapidement aux rotations négatives et *vice versa*. Une surface horizontale donnée, prise à une certaine hauteur z dans l'atmosphère, est donc traversée par des remous tantôt dirigés vers le haut, tantôt dirigés vers le bas. Dire qu'en moyenne le vent au niveau z a soufflé horizontalement pendant un temps donné signifie que la composante verticale moyenne de la vitesse du vent dirigée de bas en haut ω_0 a été pendant cet intervalle égale à la composante moyenne ω_1 dirigée de haut en bas.

Nous allons démontrer que dans ces conditions la girouette d'inclinaison doit donner pour l'inclinaison moyenne du courant réellement horizontal une valeur positive.

Soit φ_z la composante horizontale moyenne de la vitesse du vent au niveau z où est installée la girouette. Les courants ascendants proviennent d'un niveau inférieur z_0 où la composante horizontale de la vitesse du vent φ_{z_0} est inférieure à φ_z , puisque l'on sait que la vitesse du vent croît très rapidement avec la hauteur dans les couches basses. Les courants descendants proviendront d'un niveau moyen z_1 où la composante horizontale φ_{z_1} sera supérieure à φ_z . Si nous admettons que $\omega_0 = \omega_1$, c'est-à-dire que le courant est en moyenne horizontal, nous aurons pour calculer la valeur moyenne de l'inclinaison positive i_0 (courants ascendants) et de l'inclinaison négative i_1 (courants descendants) les expressions suivantes :

$$\tan i_0 = \frac{\omega_0}{\varphi_{z_0}}, \quad \tan i_1 = \frac{\omega_1}{\varphi_{z_1}};$$

comme $\omega_0 = \omega_1$, on a

$$\frac{\tan i_0}{\tan i_1} = \frac{\varphi_{z_1}}{\varphi_{z_0}};$$

φ_{z_1} étant supérieur à φ_{z_0} , il s'ensuit que i_0 est plus grand que i_1 . Donc, dans un courant qui reste en moyenne horizontal, une girouette d'inclinaison placée à une hauteur de l'ordre de celle où sont en général installés ces instruments doit indiquer une inclinaison moyenne positive. C'est là une conséquence directe de la loi qui préside à la distribution verticale des vitesses du vent dans les couches d'air voisines du sol. On ne peut donc invoquer les observations faites

à l'aide de la girouette verticale pour affirmer que l'air est en moyenne animé d'un mouvement ascendant.

Si l'hypothèse sur laquelle repose l'emploi du clino-anémomètre était exacte, c'est-à-dire si cet appareil était sensible exactement à la composante de la vitesse du vent dirigée suivant son axe, la variation de la vitesse du vent avec la hauteur n'aurait aucune importance et dans un intervalle où le vent aurait en moyenne soufflé horizontalement la somme des révolutions effectuées par le moulinet dans le sens positif serait égale à celle des révolutions négatives enregistrées pendant le même temps. Mais, comme nous l'avons vu en étudiant le moulinet A, cette hypothèse est loin de correspondre à la réalité. En fait, la vitesse de rotation du clino-anémomètre, au lieu d'être proportionnelle à la composante verticale de la vitesse du vent, est proportionnelle à une fraction de cette composante, d'autant plus petite que l'inclinaison du vent sur l'horizon est plus faible. Voici pour le moulinet A les valeurs de cette fraction pour des inclinaisons variant de 10^0 en 10^0 dans un courant dont la vitesse est égale à $12^m,9$.

Inclinaison du vent sur l'horizon.	Fraction de la composante verticale indiquée par le moulinet A.
0	
90.....	1,00
80.....	1,00
70.....	0,97
60.....	0,94
50.....	0,86
40.....	0,76
30.....	0,64
20.....	0,58
10.....	0,35
5.....	0,00

De ce Tableau il résulte que les mesures de composante verticale faites à l'aide de moulinets du genre employé pour la réalisation de l'organe sensible du clino-anémomètre doivent conduire à trouver qu'un courant, parfaitement horizontal en moyenne, possède une composante verticale dirigée vers le haut, puisque l'inclinaison moyenne des courants ascendants est plus forte que celle des courants descendants par suite de l'accroissement rapide que subit la vitesse du vent quand on s'élève dans l'atmosphère.

Une autre constatation s'impose. Si l'on considère séparément les valeurs mesurées pour la composante ascendante et la composante descendante, elles doivent être de beaucoup inférieures à la réalité. Pour des inclinaisons comprises entre 30^0 et 40^0 , le déficit doit être en gros de 30 pour 100. Le clino-anémomètre doit donc conduire à des valeurs trop faibles de l'inclinaison des courants ascendants et des courants descendants examinés isolément. Cet effet

est encore exagéré si l'on mesure la composante horizontale soit avec un moulinet à hémicylindres, soit avec un moulinet Robinson, puisque ces appareils donnent des indications notablement supérieures à la valeur de la composante horizontale même pour des inclinaisons atteignant 45° .

On pourrait croire qu'il suffirait pour remédier à ces défauts d'entourer le moulinet d'un cylindre à axe vertical. Cet essai, qu'il était indispensable de faire, a été tenté à la Tour Eiffel par M. Angot. Mais le moulinet, protégé par son cylindre, a indiqué comme les moulinets non protégés une prépondérance très nette de la composante ascendante. Il faut donc, ou bien que cette prépondérance existe réellement, ou bien que le cylindre ne canalise pas parallèlement à son axe la composante verticale des mouvements de l'air. L'expérience m'a montré que c'est à la seconde hypothèse qu'il faut s'arrêter en attendant que l'existence réelle de l'excès de la composante ascendante sur la composante descendante ait été démontrée par une autre méthode.

En effet, sous l'incidence 45° , le facteur anémométrique du moulinet *a*, qui est entouré par un cylindre, est 0,389 dans un courant d'air dont la vitesse atteint 14^m . Si le cylindre remplissait le rôle qu'on est porté à lui attribuer *a priori*, ce facteur devrait avoir comme valeur 0,320. La vitesse de rotation mesurée est donc 1,21 fois plus faible que celle qui correspond à la composante du vent suivant l'axe du cylindre, axe qui coïncide avec celui du moulinet. Or, pour le moulinet A, expérimenté sans cylindre protecteur, le facteur anémométrique mesuré sous l'incidence 45° dans un courant d'air de vitesse égale à $12^m,9$ est 1,80, soit 1,25 fois plus fort que celui qui devrait exister (1,44) si la vitesse de rotation de cet organe était proportionnelle à la composante du courant suivant son axe. On voit donc que l'on ne peut pas compter sur l'efficacité d'un cylindre de protection pour résoudre la difficulté.

Nous terminerons en examinant les conséquences qui découlent de nos expériences au point de vue de la mesure de la direction du vent à l'aide des girouettes à moulinet. Dans les instruments de cette espèce (girouette de Piazzzi-Smith, inclinomètre Dechevrens), le moulinet, muni d'ailettes planes ou gauches, attaqué par le vent suivant un certain angle, se met à tourner, et son mouvement de rotation est employé à déplacer son axe autour d'un support convenablement disposé, de manière à ramener cet axe à être perpendiculaire à la direction du courant. On a admis jusqu'à présent que le mouvement de rotation se continue jusqu'au moment où le plan du moulinet est parallèle à la direction du vent. Or nous avons vu que les organes de ce genre ne sont mis en mouvement par un courant d'air même fort que lorsque celui-ci fait avec leur plan un angle supérieur à 9° (moulinet A). On ne peut donc avoir la prétention de déterminer, avec des appareils basés sur ce principe, la direction ou l'inclinaison du vent avec une approximation supérieure au $\frac{1}{10}$ de circonférence. Cette approximation,

considérée généralement comme tolérable quand il s'agit de la direction, ne paraît pas suffisante quand on veut mesurer l'inclinaison. L'inclinomètre à moulinet est donc encore moins apte que la girouette verticale à nous renseigner sur la valeur moyenne réelle de l'inclinaison des courants aériens. D'ailleurs, en supposant que ses indications fussent suffisamment précises, il ne pourrait conduire à des résultats différents de ceux que fournit cette dernière. Il mesurerait, comme nous l'avons montré plus haut, une inclinaison apparente, conséquence directe de l'accroissement de la vitesse du vent avec la hauteur, qui, en se superposant au phénomène réel, peut le masquer en partie, sinon en totalité.

Dans l'état actuel des choses, il semble donc qu'il n'y a pas lieu de chercher à expliquer par des considérations plus ou moins compliquées le fait paradoxal mis en évidence par les mesures continues de l'inclinaison du vent réalisées à l'aide du clino-anémomètre ou de la girouette d'inclinaison. Il faut tout d'abord reprendre la mesure de la composante verticale par un procédé plus précis et vérifier la réalité physique d'un fait qui peut très bien provenir uniquement des causes que nous venons de signaler.

TROISIÈME PARTIE.

INFLUENCE DE L'INCLINAISON DU VENT SUR LA RÉSISTANCE DES AILETTES HÉMISPHÉRIQUES ET HÉMICYLINDRIQUES.

CHAPITRE I.

ESSAI D'INTERPRÉTATION DES VARIATIONS DU FACTEUR ANÉMOMÉTRIQUE EN FONCTION DE L'INCLINAISON DU VENT.

Même si l'on se borne à considérer les cas où l'état permanent est réalisé, l'explication complète du fonctionnement des moulinets anémométriques exige la solution préalable d'un trop grand nombre de problèmes, pour qu'un seul individu ait la prétention d'y arriver en l'espace de quelques années. Leur étude détaillée m'eût conduit à immobiliser pendant un laps de temps trop considérable des laboratoires destinés à des essais beaucoup plus importants au point de vue pratique, et il eût été indiscret de ma part d'abuser de l'obligeance désintéressée avec laquelle j'ai été accueilli à Auteuil et à Saint-Cyr.

J'ai donc dû limiter mes désirs et borner mes prétentions à poser quelques

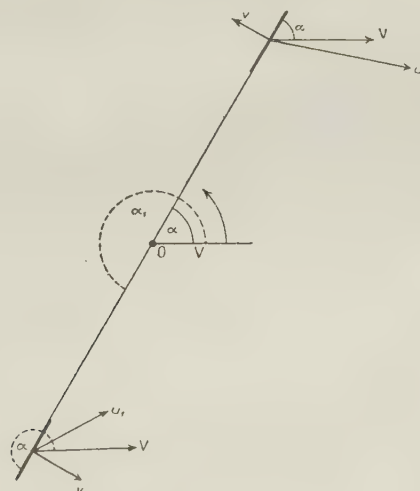
jalons destinés à indiquer la voie par laquelle on arrivera, j'en ai le ferme espoir, à se rendre compte quantitativement des phénomènes révélés par l'expérimentation.

Celle-ci nous a permis de mettre en évidence des variations curieuses du facteur anémométrique en fonction de l'inclinaison du vent. C'est à la recherche des causes qui permettent d'en donner l'explication que seront consacrés nos derniers Chapitres.

Ces variations n'obéissent pas aux mêmes lois suivant que le moulinet que l'on considère appartient à la classe des moulinets à axe parallèle ou à celle des moulinets à axe perpendiculaire. Le seul trait commun aux deux catégories d'instruments est que le facteur α n'est pas une fonction simple de l'angle formé par les filets d'air avec le plan perpendiculaire à leur axe et mené par le centre des ailettes. Il est donc indispensable de considérer à part ces deux séries d'organes anémométriques.

Moulinets à axe parallèle. — Nous avons vu que pour les moulinets à axe parallèle le facteur anémométrique croît, à mesure que l'inclinaison du vent sur leur plan diminue, beaucoup plus rapidement qu'on ne pourrait s'y attendre si leur vitesse de rotation était proportionnelle à la composante de la vitesse du vent dirigée suivant leur axe. A notre sens, ce phénomène peut s'expliquer par quelques considérations simples qui, si elles ne permettent pas de relier quantitativement les variations de la vitesse de rotation à celles de l'inclinaison, ont cependant l'avantage de montrer de quelle manière doit se modifier le facteur anémométrique quand l'angle suivant lequel le vent attaque le plan du moulinet vient à changer.

Fig. 31.



Soit un système de deux ailettes planes ou gauches, de même surface et de même forme, reliées symétriquement à un axe horizontal par l'intermédiaire de deux

bras égaux. (*fig. 31*). Pour maintenir ce système en rotation dans l'air calme avec une certaine vitesse angulaire ω , il faut dépenser par unité de temps un certain travail $\mathcal{P}$. En effet, chacun des points de l'ailette se déplace par rapport à l'air avec une vitesse ωr , r étant sa distance à l'axe; il en résulte que l'ailette subit une certaine pression proportionnelle au carré de sa vitesse angulaire et faisant avec le bras un angle donné. Cette pression possède une composante normale au bras, dirigée perpendiculairement à l'axe de rotation et appliquée à une certaine distance R de celui-ci. C'est à équilibrer le travail effectué par cette composante qu'est employé le travail qu'il faut dépenser pour entretenir la rotation. Nous allons tâcher d'évaluer ce dernier.

Le point de l'ailette situé à une distance R de l'axe possède une vitesse linéaire $v = \omega R$, et nous pouvons admettre que la composante qui s'oppose au mouvement est donnée par $K v^2$, K étant un certain coefficient de proportionnalité. Pour faire tourner d'un angle $d\alpha$ le système des deux ailettes que nous avons considéré il faut effectuer un certain travail

$$d\mathcal{C} = 2 K v^2 R d\alpha,$$

et le travail correspondant à une révolution complète est donné par

$$\mathcal{C} = \int_0^{2\pi} 2 K v^2 R d\alpha = 4 \pi R \times K v^2.$$

Si le nombre de révolutions est égal à n , on a

$$\mathcal{P} = n \mathcal{C} = 4 \pi n R \times K v^2.$$

Comme

$$2 \pi n = \omega \quad \text{et} \quad v = \omega R,$$

il en résulte que

$$\mathcal{P} = 2 K \omega^3 R^3 \quad \text{ou} \quad \mathcal{P} = 2 K v^3;$$

autrement dit, la puissance nécessaire pour entretenir le mouvement de rotation est, pour un moulinet donné, proportionnelle au cube de la vitesse angulaire. Dans des moulinets formés d'ailettes semblablement disposées et identiques, elle croît proportionnellement au nombre des ailettes et au cube de la longueur des bras.

Supposons maintenant qu'au lieu de faire tourner dans l'air maintenu à l'état de repos le système de deux ailettes que nous avons considéré ci-dessus, nous cherchions à lui communiquer la même vitesse angulaire après l'avoir placé dans un courant d'air de vitesse V et normal à son axe.

La pression que subit dans une position donnée l'une des ailettes est fonction de sa vitesse u par rapport à l'air supposé à l'état de repos, il en est de même de la composante de cette pression perpendiculaire au bras et située dans le plan du moulinet. Lorsque le bras fait avec le courant d'air un angle α , cette

composante est proportionnelle au carré de la valeur actuelle de u et le travail qu'il faut effectuer pour faire tourner cette ailette de $d\alpha$ est donné par

$$d\tau = k_{\alpha} u_{\alpha}^2 R d\alpha,$$

dans laquelle les indices dont sont affectés les coefficients k et u indiquent que le travail élémentaire qu'il faut effectuer pour faire tourner l'ailette de $d\alpha$ est fonction des valeurs actuelles de k et de u qui dépendent elles-mêmes de l'angle formé par les bras et les filets du courant d'air. On sait en effet que la pression de l'air sur une surface donnée dépend de l'angle sous lequel cette surface est attaquée. Or, dans le cas actuel, on ne peut plus supposer, comme il était légitime de le faire quand nous déplaçons les ailettes dans l'air calme, que l'angle d'attaque reste le même pendant tout le cours d'une révolution. Dans ces conditions, k sera une certaine fonction de α , soit $k = f(\alpha)$; on sait d'ailleurs que u est donné en fonction de v (vitesse linéaire du point situé à la distance R de l'axe), de V et de α par la formule

$$u^2 = V^2 + v^2 + 2Vv \sin \alpha.$$

On a donc

$$d\tau = f(\alpha) R [V^2 + v^2 + 2Vv \sin \alpha] d\alpha$$

et le travail correspondant à une révolution complète d'une ailette est

$$\tau = \int_0^{2\pi} f(\alpha) R [V^2 + v^2 + 2Vv \sin \alpha] d\alpha = R(V^2 + v^2) \int_0^{2\pi} f(\alpha) d\alpha + 2RVv \int_0^{2\pi} f(\alpha) \sin \alpha d\alpha.$$

Pour évaluer ces intégrales, il faudrait connaître la fonction $k = f(\alpha)$; nous ne possédons pas cette donnée, mais, comme k est une fonction périodique de α , $f(\alpha)$ peut être développée en série trigonométrique

$$f(\alpha) = A_0 + a_1 \sin \alpha + b_1 \cos \alpha + a_2 \sin 2\alpha + b_2 \cos 2\alpha + \dots$$

On voit alors que τ ne peut pas être indépendant de V .

En effet, si, pour plus de commodité, nous limitons le développement aux termes en α , nous trouvons, dans le cas où A_0 est nul,

$$\tau = 2\pi a_1 R V v,$$

et si A_0 est différent de 0

$$\tau = 2\pi R [A_0 (V^2 + v^2) + a_1 V v].$$

Par conséquent, la puissance $2n\tau = \mathcal{P}_1$, nécessaire pour entretenir la rotation du système à n tours par seconde, dépend de la vitesse du courant dans lequel il est placé. Comme nous ne connaissons ni A_0 ni a_1 , il faut avoir recours à l'expérience pour savoir dans quel sens $\mathcal{P}$ varie quand V augmente. J'ai pu faire à ce sujet quelques expériences qui m'ont permis de le déterminer.

On communique à un moulinet à axe parallèle une certaine vitesse de rotation dans l'air calme. A un moment donné, on l'abandonne à lui-même et l'on déter-

mine le nombre de secondes t nécessaire pour que sa vitesse de rotation s'annule. On recommence ensuite l'expérience dans un courant d'air perpendiculaire à l'axe et de vitesse V et l'on note le temps t_1 au bout duquel le mouvement s'arrête.

Dans les deux cas, la vitesse angulaire devient égale à 0 quand le travail accompli par les forces dues à la résistance de l'air est égal à la puissance vive que possédait le moulinet quand on l'a abandonné à lui-même. Par conséquent, suivant que t_1 sera plus grand ou plus petit que t , le travail accompli dans le second cas par les forces dues à la résistance de l'air pour une révolution du moulinet sera plus petit ou plus grand que dans le premier. L'expérience montre qu'avec les moulinets à axe parallèle, t_1 est toujours plus petit que t et d'autant plus que V est plus grand. On en conclut que la puissance consommée pour entretenir la rotation d'un moulinet à axe parallèle dans un courant d'air perpendiculaire à son axe est plus grande que celle qu'il faut dépenser en air calme et qu'elle croît avec la vitesse du courant.

Il devient alors très simple d'expliquer la variation de la vitesse de rotation des moulinets à axe parallèle en fonction de l'inclinaison que nous avons constatée dans un courant d'air de vitesse constante. Soient V la vitesse du courant, i l'inclinaison; considérons les deux composantes de V dirigées, l'une suivant l'axe du moulinet, $V \sin i$, et l'autre perpendiculaire à cet axe, $V \cos i$. La première tend à communiquer au moulinet une certaine vitesse angulaire $\omega_i = \omega_{90} \sin i$, la seconde agit pour retarder le mouvement de rotation comme le ferait une augmentation des frottements, il s'ensuit que la vitesse angulaire que l'on mesure doit être inférieure au produit $\omega_{90} \sin i$ et d'autant plus que i se rapproche davantage de 0° . Pour une inclinaison suffisamment petite, le frottement supplémentaire introduit par la composante $V \cos i$, joint aux frottements de l'axe sur ses coussinets, est suffisant pour équilibrer la composante motrice de la pression du vent sur les ailettes, le moulinet ne peut plus être mis en mouvement et la vitesse angulaire est nulle pour toutes les inclinaisons inférieures à cette valeur critique.

Ce sont bien là les faits mis en lumière par nos expériences.

Moulinets à axe perpendiculaire. — Dans le cas des moulinets à axe perpendiculaire, les résultats expérimentaux sont beaucoup plus difficiles à interpréter. Si l'on constate encore l'existence d'une inclinaison critique, pour laquelle la vitesse de rotation s'annule, on trouve d'autre part que, si l'on excepte les moulinets à hémicylindres perpendiculaires aux bras et dépourvus de demi-bases, la rotation change de sens quand on dépasse l'inclinaison critique, phénomène qui ne se produit pas avec les moulinets à axe parallèle, si le courant dans lequel on opère est bien uniforme.

D'autre part, la vitesse de rotation ne varie guère quand l'inclinaison passe de 0° à 40° , tandis qu'elle décroît ensuite suivant une loi très rapide. On est donc conduit à penser que c'est dans les variations de l'effort exercé par le vent sur les ailettes hémisphériques ou hémicylindriques en fonction de l'angle formé par le courant avec la normale au plan diamétral que l'on doit rechercher l'explication des changements qu'éprouve la vitesse de rotation d'un moulinet quand l'inclinaison du vent sur son plan prend diverses valeurs.

En effet, lorsque l'angle d'attaque sur le plan du moulinet est égal à 0° , ce qui correspond aux conditions de fonctionnement normal, on peut admettre qu'à partir du moment où l'état permanent est atteint, le travail moteur est égal au travail résistant pour une révolution complète des coupes. Le travail moteur est dû à l'action du courant d'air sur la partie concave des ailettes, le travail résistant comprend l'effet du vent sur leur face convexe et les frottements axiaux. Nous considérerons ces derniers comme négligeables.

Quand la vitesse du vent est V , l'égalité du travail moteur et du travail résistant est réalisée quand le moulinet possède une certaine vitesse angulaire correspondant à n tours par seconde. Si la vitesse devient $V' > V$, les forces motrices augmentent et la vitesse angulaire s'accroît de manière à rétablir l'égalité du travail résistant au travail moteur. Supposons que, sans changer la vitesse du courant d'air, nous augmentions par un artifice quelconque les forces motrices sans modifier proportionnellement les forces résistantes, la rotation s'accélérera de manière à ramener le système à obéir à la condition ci-dessus : égalité du travail moteur et du travail résistant.

C'est bien ce qui semble se passer lorsque, sans faire varier la vitesse du courant d'air, on incline le plan d'un moulinet à axe perpendiculaire par rapport à la direction du courant de manière que l'angle d'attaque soit différent de 0° . Il semble donc probable que les changements constatés dans la valeur du facteur anémométrique quand l'incidence varie sont intimement liés aux variations que subit la composante normale au plan diamétral de l'effort exercé par l'air en mouvement sur un hémisphère ou un hémicylindre creux, quand l'inclinaison des filets d'air sur ce plan prend des valeurs différentes.

Comme à l'heure actuelle on ne possède sur ce sujet aucune donnée précise, il m'a paru utile de compléter les résultats obtenus en étudiant les moulinets, par la détermination de la résistance d'un hémisphère et d'un hémicylindre creux placés dans un courant d'air sous diverses incidences, afin de m'assurer que cette manière de voir correspond réellement aux faits expérimentaux.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE D'UN HÉMISPÈRE CREUX EN FONCTION DE L'INCLINAISON DU VENT SUR SON PLAN DIAMÉTRAL.

Méthode de mesure. — La méthode que nous avons employée pour déterminer les variations de la résistance d'une coupe hémisphérique placée dans un courant d'air, suivant l'inclinaison du plan diamétral par rapport à la direction du vent, est celle qui est couramment employée dans les laboratoires aérodynamiques. Nos premières mesures, faites au Laboratoire d'Auteuil, ont porté sur un hémisphère creux en cuivre ayant 25^{cm} de diamètre, mis gracieusement à notre disposition par M. Eiffel. Elles nous ont permis de déceler l'existence d'une poussée verticale dirigée de haut en bas lorsque le plan diamétral de l'hémisphère est parallèle aux filets d'air, sa concavité étant tournée vers le bas. Le sens de la rotation des moulinets Robinson lorsque le vent fait avec leur plan un angle de 90° permettait d'ailleurs de prévoir l'existence et la direction de cette poussée. En faisant varier l'angle d'attaque de 10° en 10° entre 0° et 90° et en mesurant la traînée et la poussée correspondant à chaque incidence, nous avons pu montrer que la poussée, négative pour l'incidence 0°, s'annule pour une incidence comprise entre 0° et 5°, puis devient positive et passe par un maximum vers 40°, tandis que la traînée qui croît d'abord rapidement jusqu'à 30° continue à s'accroître, quoique beaucoup plus lentement, jusqu'à ce que l'angle d'attaque atteigne 90°. Nous n'avons pas cru devoir pousser plus loin les mesures sur cet hémisphère, à cause des vibrations d'amplitude considérable dont il était le siège quand l'angle d'attaque se rapprochait de 90° et parce que son diamètre était beaucoup plus grand que celui des plus grandes coupes employées en France pour la construction des moulinets Robinson.

J'ai repris et complété ces expériences à l'Institut aérotechnique en opérant sur une coupe, prêtée par la maison Richard, ayant comme diamètre intérieur 131^{mm} et comme diamètre extérieur 133^{mm}. J'ai pu mener à bien ce travail, grâce à la complaisance de M. Toussaint, qui a bien voulu m'initier à l'emploi de la balance aérodynamique installée dans la grande soufflerie de cet établissement et mettre à ma disposition le personnel nécessaire pour effectuer les essais. La balance dont je me suis servi, réalisée sur les plans de M. Drzewiecki, permet de mesurer simultanément la composante horizontale (traînée) de l'effort exercé par l'air en mouvement sur l'objet dont on veut connaître la résistance et la somme algébrique de la traînée et de la composante verticale (poussée).

Chaque expérience comporte la mesure simultanée de trois éléments :

- 1^o La traînée;
- 2^o La somme algébrique de la traînée et de la poussée;
- 3^o La différence de pression entre l'atmosphère du hall et l'intérieur de la chambre d'expériences d'où l'on déduit la vitesse du courant d'air à 15° et 760^{mm}.

Trois expérimentateurs doivent donc opérer en même temps; on obtient la simultanéité des mesures de la manière suivante :

A l'aide de poids marqués, l'un des opérateurs équilibre la traînée, l'autre la somme algébrique de la traînée et de la poussée. Chacun d'eux opère indépendamment de l'autre et appuie sur un bouton placé à sa portée quand l'équilibre est réalisé. Ces boutons font partie d'un circuit comprenant une pile, un voyant et une sonnerie. Quand l'un des opérateurs agit sur le bouton correspondant, le voyant est actionné et avertit l'expérimentateur chargé de la lecture du manomètre d'avoir à se tenir prêt. Lorsqu'on appuie sur les deux boutons en même temps, le circuit de la sonnerie est fermé; au signal que donne cette dernière, l'aide placé au manomètre fait sa lecture et note sur une feuille spéciale les trois données recueillies simultanément dont on déduit ultérieurement la poussée, la traînée et la vitesse du vent rapportée à 15° et 760^{mm}.

Les valeurs de la traînée s'obtiennent à 5^g près, celles de la somme algébrique de la traînée et de la poussée à 10^g près, on est donc obligé d'opérer sur des corps d'assez grandes dimensions et à des vitesses assez élevées du courant d'air pour obtenir une précision suffisante.

Les nombres fournis par les pesées ne peuvent être directement utilisés pour la détermination des composantes de la force exercée par le vent sur le corps fixé au bras de la balance. Il est nécessaire de leur faire subir un certain nombre de corrections que l'on détermine par l'expérience. Ces corrections sont relatives à l'action exercée par le courant d'air sur le bras et sur les bielles qui servent à fixer la pièce étudiée sur ce dernier. Deux séries d'expériences, faites, les unes avec l'objet séparé des bielles, les autres avec l'objet fixé à celles-ci, permettent de les connaître. Elles sont égales en gros au dixième de la quantité mesurée et l'on a pu les déterminer avec une approximation comprise entre 10 et 20 pour 100 de leur valeur.

Par suite du volume assez considérable du carter entourant le bras de la balance, les filets d'air au voisinage du point où étaient placées les surfaces soumises aux essais n'étaient pas rigoureusement horizontaux. L'inclinaison mesurée par M. Toussaint a été reconnue égale à 1°₃ environ. J'en ai tenu compte dans mes calculs.

Marche des expériences. — L'hémisphère est fixé au bras de la balance par

l'intermédiaire de deux bielles; en se servant d'un inclinomètre, on le cale dans la position que l'on désire. L'inclinomètre permet de connaître l'angle formé par le plan diamétral avec l'horizontale, angle dont on déduit ultérieurement l'incidence.

On détermine ensuite la valeur de la traînée et de la somme algébrique de celle-ci et de la poussée pour une vitesse du vent sensiblement égale à 20 m : sec. On recommence l'expérience en séparant l'hémisphère des bielles. Puis on procède à une nouvelle série de mesures en faisant varier l'angle d'attaque d'une dizaine de degrés; et ainsi de suite. Au voisinage de l'incidence 0° , nous avons opéré de 3° en 3° .

Résultats des mesures. — Les nombres ainsi obtenus ont été divisés par le carré de la vitesse du vent dans lequel ils avaient été déterminés et qui est restée comprise entre $17^{\text{m}},5$ et $21^{\text{m}},5$, puis on les a multipliés par 400 de manière à les faire correspondre tous à une vitesse du vent égale à 20 m : sec.

Ils ont ensuite servi, après avoir été corrigés de l'influence du vent sur les bielles et le bras de la balance, à construire une courbe sur laquelle on a relevé les nombres contenus dans le Tableau ci-contre.

Dans ce Tableau, la première colonne contient les incidences i . Elles sont comptées par rapport au plan diamétral; l'incidence 0° correspond à la position pour laquelle ce plan est parallèle au courant d'air, la convexité de l'hémisphère étant tournée vers le haut, l'incidence -90° correspond au cas où la coupe présente sa convexité au vent, l'incidence 90° à celui où elle lui présente sa concavité, le plan diamétral étant dans les deux cas perpendiculaire aux filets d'air. La seconde colonne contient les valeurs de la poussée, p , positive quand elle est dirigée de bas en haut, négative dans le cas contraire. Dans la troisième sont données les valeurs de la traînée T . Les deux dernières contiennent la résultante de ces deux forces, R , et l'angle α formé par celle-ci avec le courant d'air ou l'horizontale, positif quand R est dirigé vers le haut, négatif dans le cas contraire.

Les nombres correspondant à p , T et R sont exprimés en grammes, ils représentent la valeur de ces éléments pour la coupe considérée (diamètre extérieur, 133^{mm} ; diamètre intérieur, 131^{mm}) dans un courant d'air de 20 m : sec.

Un fait extrêmement curieux qui se dégage de l'examen des nombres ci-après est que la poussée est nulle pour quatre positions différentes de la coupe quand on passe de l'incidence 90° à l'incidence -90° , mais qu'elle n'est négative que dans un intervalle très restreint compris entre les incidences $+2^{\circ}$ et -2° . Même sous l'incidence -80° , l'hémisphère que nous avons étudié est soumis dans un courant d'air de 20 m : sec à une poussée dirigée vers le haut et dont la valeur est nettement supérieure aux erreurs d'expérience pos-

sibles. Cette poussée passe par deux maxima inégaux, le plus fort correspond à l'incidence 45° environ, l'autre plus aplati vers -40° . Le minimum, négatif, se produit vers -2° .

VARIATION DE LA RÉSISTANCE D'UN HÉMISPÈRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE
DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec

$$t = 15^{\circ}, \quad H = 760^{\text{mm}}.$$

$i.$	$p.$	T.	R.	$\alpha.$
$^{\circ}$	g	g	g	$^{\circ}$
90°	0	512	512	0
80°	106	500	511	12
70°	216	491	554	24
60°	348	485	597	36
50°	455	470	654	44
40°	467	434	638	47
30°	419	332	535	52
20°	286	211	355	54
10°	134	98	166	54
0°	— 24	68	72	— 19
-2°	— 36	65	74	— 28
-4°	— 27	68	73	— 22
-6°	33	74	81	24
-10°	80	85	117	43
-20°	115	117	164	45
-30°	122	146	190	40
-40°	125	167	208	37
-50°	119	172	210	35
-60°	101	159	188	32
-70°	73	137	155	28
-80°	37	122	128	17
-90°	0	134	134	0

La traînée présente une anomalie non moins remarquable. Maximum pour $i = 90^{\circ}$, elle passe par son minimum absolu pour une incidence comprise entre 0° et -3° , mais elle a en outre un maximum relatif pour une valeur de l'angle d'attaque située entre -45° et -50° et qui semble très voisine de -48° . Il suffit de se reporter aux graphiques de la figure 32 pour se faire une idée très nette de ces anomalies.

La résistance totale présente également ce maximum secondaire; mais son maximum principal, au lieu de correspondre à l'incidence 90° , se rencontre pour une inclinaison du courant d'air par rapport au plan diamétral sensiblement égale à 45° . A ce moment, on peut la considérer comme normale à ce dernier. Le même fait se reproduit lorsque l'incidence est -20° . L'angle que fait la résultante de la traînée et de la poussée avec l'horizontale est toujours positif, sauf dans l'intervalle où l'incidence est comprise entre 2° et -5° .

Au point de vue du fonctionnement des moulinets, il est surtout intéressant de considérer la composante normale au plan diamétral de l'effort exercé par

le vent sur les coupes. C'est en effet cette composante qui intervient principalement pour modifier la vitesse de rotation des anémomètres Robinson, quoique, en toute rigueur, on ne puisse pas dans tous les cas négliger l'action de la composante tangentielle. En effet, celle-ci est bien équilibrée en partie par la résistance des bras à la traction ou à la compression, mais elle n'en exerce pas moins sur les coupes une action déformatrice qui vient s'ajouter à celle de la force centrifuge et dont les effets dépendent du mode de fixation des hémisphères et de leur rigidité.

Le calcul de la composante normale N et de la composante tangentielle t s'effectue facilement à partir des valeurs de R et de α contenues dans le Tableau page 123. Nous les donnons ci-dessus ainsi que l'angle θ formé par R avec la normale au plan diamétral, cette dernière étant considérée comme positive quand elle est dirigée de la concavité vers la convexité, θ se calcule par la formule

$$\theta = \alpha + i - \frac{\pi}{2};$$

RÉSISTANCE D'UN HÉMISPHERE CREUX DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec A 15° ET 760^{mm}.

Variation de la composante normale et de la composante tangentielle en fonction de l'incidence.

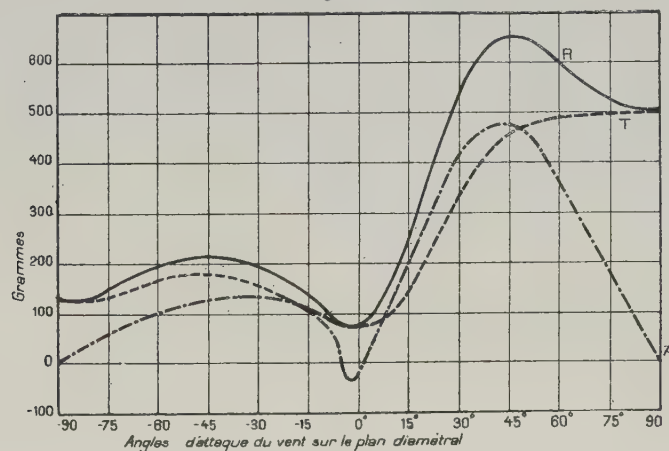
$i.$	$N.$	$t.$	$\theta.$
0		g	0
90	512	0	0
80	510	18	2
70	553	39	4
60	594	63	6
50	653	46	4
40	637	— 33	— 3
30	530	— 74	— 8
20	341	— 98	— 16
10	149	— 73	— 26
0	— 23	— 68	— 109
— 2	— 37	— 64	— 120
— 4	— 32	— 66	— 116
— 6	25	— 77	— 72
— 10	64	— 98	— 57
— 20	69	— 149	— 65
— 30	33	— 187	— 80
— 40	— 11	— 208	— 93
— 50	— 54	— 203	— 105
— 60	— 88	— 166	— 118
— 70	— 104	— 115	— 132
— 80	— 114	— 58	— 153
— 90	— 134	0	± 180

il est positif ainsi que la composante tangentielle quand la résultante est inclinée vers la droite d'un observateur regardant la concavité de l'hémisphère et recevant le vent du côté droit. Suivant la convention que nous avons adoptée pour

le sens de la normale, N est positive quand elle est dirigée de la concavité vers la convexité, négative dans le cas contraire. Comme ci-dessus, les composantes normale et tangentielle sont exprimées en grammes et correspondent à une

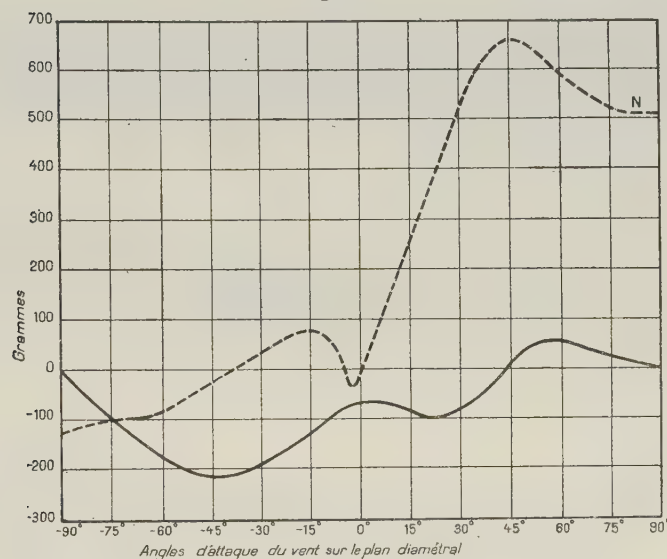
RÉSISTANCE D'UN HÉMISPHÈRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE DANS UN COURANT D'AIR
DE 20 m : sec. A 15° ET 760^{mm}.

Fig. 32.



Poussée (p), traînée (T) et résistance totale (R).

Fig. 33.



Composante normale (N) et composante tangentielle (t) au plan diamétral.

vitesse du courant d'air égale à 20 m : sec à la température de 15° et sous la pression de 760^{mm}.

Quand l'incidence varie de $+90^\circ$ à -90° , N s'annule pour trois valeurs différentes de l'angle d'attaque, situées, la première entre $+5^\circ$ et 0° , la seconde entre -4° et -6° , la troisième entre -35° et -40° . Elle présente deux maxima positifs, l'un pour une incidence voisine de 45° , l'autre pour une incli-

naison comprise entre -15° et -20° ; ces deux maxima sont séparés par un minimum négatif vers -3° et le minimum absolu se produit pour l'angle -90° .

La composante tangentielle est tantôt à droite, tantôt à gauche de la normale au plan diamétral. Pour les incidences positives supérieures à 45° , elle est dirigée vers la droite d'un observateur tourné vers la concavité de la coupe et présentant le côté droit au vent; pour les autres incidences, positives ou négatives, elle est dirigée vers la gauche du même observateur.

Elle s'annule pour une valeur de l'angle d'attaque voisine de 45° .

La résultante n'est pas en général perpendiculaire au plan diamétral; cependant elle s'écarte assez peu de cette position pour les incidences supérieures à 40° . Vers 45° , elle coïncide très sensiblement avec la normale à ce plan. Par raison de symétrie, la coïncidence est rigoureuse à 90° et -90° .

Variation du coefficient de résistance avec la vitesse du vent. — M. Eiffel a montré que le coefficient de résistance d'un hémisphère creux, dans le cas où l'incidence est 90° ou -90° , n'est pas indépendant de la vitesse du vent. Il semble donc probable qu'il en doit être de même pour les autres valeurs que peut prendre l'incidence. En opérant à diverses vitesses, sous des angles d'attaque égaux à 90° , 45° , 0° , -45° et -90° , j'ai trouvé qu'en effet le coefficient de résistance de l'hémisphère qui m'a servi pour mes expériences subit une variation notable avec la vitesse du vent et que la loi de cette variation est fonction de l'angle d'attaque. On trouvera les résultats que j'ai obtenus dans le Tableau ci-après qui contient les quotients par le carré de la vitesse des valeurs de la poussée, de la traînée, de la résistance totale, de la composante normale et de la composante tangentielle, ainsi que des angles α et θ formés par la résultante avec l'horizontale et avec la normale au plan diamétral.

On a donné à titre d'indication les mesures faites à la vitesse de 5 m : sec quoiqu'elles comportent une erreur relative assez élevée; cependant les nombres trouvés sous l'incidence 0° sont trop discordants pour que j'aie cru pouvoir en faire état.

VARIATION DU COEFFICIENT DE RÉSISTANCE D'UN HÉMISPHERE CREUX SOUS DIVERSES INCIDENCES
EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT.

λ .	$\frac{P}{V^2}$.	$\frac{T}{V^2}$.	$\frac{R}{V^2}$.	α .	$\frac{N}{V^2}$.	$\frac{t}{V^2}$.	θ .
$i = 90^{\circ}$.							
m							
5	0	1,47	1,47	0	1,47	0	0
10	0	1,36	1,36	0	1,36	0	0
15	0	1,31	1,31	0	1,31	0	0
20	0	1,28	1,28	0	1,28	0	0
25	0	1,28	1,28	0	1,28	0	0
30	0	1,28	1,28	0	1,28	0	0
35	0	1,28	1,28	0	1,28	0	0

VARIATION DU COEFFICIENT DE RÉSISTANCE D'UN HÉMISPÈRE CREUX SOUS DIVERSES INCIDENCES
EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT (*suite*).

V.	$\frac{p}{V^2}$	$\frac{T}{V^2}$	$\frac{R}{V^2}$	α	$\frac{N}{V^2}$	$\frac{t}{V^2}$	θ
$i = 45^\circ$.							
m				0			0
5	1,29	1,23	1,78	46	1,78	+0,03	+ 1
10	1,14	1,18	1,64	44	1,64	—0,03	— 1
15	1,15	1,15	1,62	45	1,62	0,00	0
20	1,15	1,13	1,61	46	1,61	+0,03	+ 1
25	1,16	1,12	1,61	46	1,61	+0,03	+ 1
30	1,16	1,12	1,61	46	1,61	+0,03	+ 1
35	1,16	1,12	1,61	46	1,61	+0,03	+ 1
$i = 0^\circ$.							
5	»	»	»	»	»	»	»
10	—0,02	0,24	0,24	— 4	—0,02	—0,24	— 94
15	—0,06	0,19	0,20	—18	—0,06	—0,19	—108
20	—0,06	0,17	0,18	—19	—0,06	—0,17	—109
25	—0,04	0,16	0,17	—13	—0,04	—0,16	—103
30	—0,03	0,16	0,17	—10	—0,03	—0,16	—100
35	—0,03	0,16	0,17	—10	—0,03	—0,16	—100
$i = -45^\circ$.							
5	—0,78	0,48	0,91	—59	—0,89	0,22	+166
10	+0,06	0,42	0,43	8	—0,26	—0,34	—127
15	+0,24	0,42	0,49	29	—0,13	—0,47	—106
20	+0,31	0,42	0,52	36	—0,08	—0,52	— 99
25	+0,33	0,42	0,54	38	—0,07	—0,53	— 97
30	+0,34	0,42	0,54	38	—0,07	—0,54	— 97
35	+0,34	0,42	0,54	38	—0,07	—0,54	— 97
$i = -90^\circ$.							
5	0	0,39	0,39	0	—0,39	0	±180
10	0	0,40	0,40	0	—0,40	0	180
15	0	0,35	0,35	0	—0,35	0	180
20	0	0,33	0,33	0	—0,33	0	180
25	0	0,31	0,31	0	—0,31	0	180
30	0	0,30	0,30	0	—0,30	0	180
35	0	0,29	0,29	0	—0,29	0	180

Le coefficient de résistance totale $\frac{R}{V^2}$ tend à diminuer à mesure que la vitesse du vent augmente, sauf sous l'incidence -45° , où il subit une augmentation de l'ordre de 20 pour 100, quand on passe de 10^m à 35^m . Si l'on examine à part le coefficient de traînée et le coefficient de poussée, on remarque que, sous l'incidence 45° , $\frac{p}{V^2}$ tend à augmenter avec la vitesse du vent; cette augmentation est beaucoup plus marquée quand l'angle d'attaque est -45° ; à 0° , le quotient par le carré de la vitesse de la poussée dirigée vers le bas que subit l'hémisphère passe par un maximum pour les vitesses comprises entre 15^m et 20^m .

Quant au coefficient $\frac{N}{V^2}$, la variation que nos expériences mettent en évidence est extrêmement intéressante et permet de donner une explication de la diminution que subit le facteur anémométrique des moulinets Robinson à mesure qu'augmente la vitesse du courant d'air dans lequel ils sont placés. Sous l'incidence 45° , $\frac{N}{V^2}$ est positif et correspond à un effort moteur dans les moulinets à coupes hémisphériques; sous l'incidence -45° , il est négatif et correspond à un effort résistant. Or les résultats que nous avons trouvés montrent que sous ces deux angles d'attaque, que l'on peut considérer comme représentant les conditions moyennes, l'effort résistant décroît beaucoup plus rapidement que l'effort moteur, à mesure que la vitesse du vent augmente, tandis que, sous l'incidence 90° , la différence entre ces deux efforts reste à peu près constante. Cet effet est d'autant plus sensible que, lorsque le moulinet est en rotation, la vitesse relative de l'hémisphère est plus grande quand il présente sa convexité au vent que dans le cas contraire. En faisant la somme algébrique des valeurs de $\frac{N}{V^2}$ pour les incidences 45° et -45° aux différences vitesses, on voit immédiatement que la différence entre l'effort moteur et l'effort résistant croît d'abord très rapidement, puis plus lentement pour tendre vers une valeur constante. Il s'ensuit que le quotient de la vitesse du vent par la vitesse de rotation d'un moulinet Robinson, c'est-à-dire le facteur anémométrique, doit décroître à mesure que la vitesse du vent augmente, très rapidement aux faibles vitesses, plus lentement aux vitesses moyennes, et rester sensiblement constant aux vitesses élevées.

Ce décroissement sera d'ailleurs d'autant plus net que les bras des moulinets seront plus longs par rapport au diamètre des coupes, c'est-à-dire que les conditions dans lesquelles ces dernières n'exercent plus aucune action les unes sur les autres seront le plus près d'être réalisées. Ce sont bien là les phénomènes que l'expérience permet de constater.

Les variations que subit la quantité $\frac{N}{V^2}$, tant en fonction de l'incidence des filets d'air qu'en fonction de leur vitesse, permettent de montrer qu'il ne peut exister de relation simple entre la vitesse de rotation d'un moulinet Robinson et la composante de la vitesse du vent perpendiculaire à son axe.

A l'aide des données ci-dessus, on peut, en effet, moyennant quelques hypothèses, arriver à calculer approximativement quel serait le rapport entre la vitesse linéaire du centre des coupes, v , et la vitesse du vent V , pour les diverses inclinaisons de ce dernier par rapport au plan d'un moulinet constitué avec des hémisphères semblables à celui sur lequel ont porté les mesures. Si, pour simplifier, on fait abstraction des frottements axiaux et de la résistance des bras, et si l'on suppose que ceux-ci sont assez longs pour qu'il soit légitime d'admettre

que la vitesse relative des différents points de l'ailette est très sensiblement la même, voici les résultats que l'on obtient :

Inclinaison du vent sur le plan du moulinet.	Rapport $\frac{v}{V}$ calculé.
0	0,47
10	0,48
20	0,50
30	0,51
40	0,50
50	0,48

Le moulinet R, qui comporte des coupes de 134^{mm} de diamètre, prend dans un courant d'air de vitesse égale à 20 m : sec une vitesse de rotation correspondant à une valeur du rapport $\frac{v}{V}$ égale à 0,42. L'écart entre ce nombre et celui que nous avons calculé, 0,47, est de 11 pour 100; il est tout à fait acceptable eu égard aux hypothèses que nous avons dû introduire.

Le calcul s'accorde avec l'observation pour démontrer l'existence d'un maximum de la vitesse de rotation quand l'inclinaison du vent sur le plan du moulinet est voisine de 30°. D'après le Tableau ci-dessus, la vitesse de rotation s'accroît de 8 pour 100 quand on passe de l'inclinaison 0° à l'inclinaison 30°; cet accroissement est du même ordre de grandeur que celui que l'expérience a mis en évidence pour les moulinets à longs bras (E, 5 pour 100; J, 4 pour 100).

Quand l'inclinaison devient supérieure à 40°, l'accord entre le calcul et l'observation n'est plus aussi satisfaisant. Il n'y a pas lieu de s'en étonner, car l'influence de la portion de la courbe $\frac{N}{V^2} = f(i)$ dans laquelle se manifestent les plus fortes variations de $\frac{N}{V^2}$ en fonction de V tend à devenir prépondérante quand l'inclinaison du vent sur le plan du moulinet atteint des valeurs élevées et, dans ces conditions, l'hypothèse que nous avons faite en admettant que $\frac{N}{V^2}$ était constant s'écarte trop de la réalité pour être légitime.

Nous ne nous attarderons pas davantage sur les résultats fournis par le calcul. Pour aller plus loin dans cette voie, il serait indispensable de connaître les courbes $\frac{N}{V^2} = f(i)$ pour toute une série de valeurs de V suffisamment rapprochées pour permettre l'interpolation. Il serait fort utile, d'ailleurs, d'opérer sur des hémisphères de différentes grandeurs, car, par analogie avec ce qui a été trouvé concernant la résistance des sphères, il y a tout lieu de penser que les variations du coefficient de résistance des hémisphères en fonction de la vitesse du courant d'air dépendent dans une certaine mesure du diamètre de ces derniers. Il semble que c'est dans cette voie qu'il faut rechercher l'explication des particularités que présente chaque famille de moulinets Robinson.

Tout en montrant que les effets attribués jusqu'à présent au frottement de l'axe sur ses coussinets doivent être rapportés pour une bonne part aux variations que subit le coefficient de résistance des hémisphères quand la vitesse du vent vient à changer de valeur, ces considérations permettent d'entrevoir les raisons pour lesquelles il a été jusqu'à présent impossible d'établir une formule empirique générale permettant de calculer avec une approximation suffisante les coefficients de la formule anémométrique d'un moulinet Robinson d'après les dimensions des divers organes qui le constituent.

CHAPITRE III.

ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCLINAISON DU VENT SUR SON PLAN DIAMÉTRAL.

Remarques préliminaires. — Les mesures ont été faites sur un hémicylindre en laiton ayant 133^{mm} de hauteur, 132^{mm} de diamètre extérieur et 129^{mm},5 de diamètre intérieur. L'étude a été conduite de la même manière que pour l'hémisphère :

1° En plaçant l'axe horizontalement et perpendiculairement aux filets d'air et en faisant tourner l'hémicylindre autour de cet axe maintenu dans cette position ;

2° En plaçant l'axe dans un plan vertical et en faisant tourner le même hémicylindre autour d'une droite normale à cet axe, contenue dans le plan diamétral, horizontale et perpendiculaire à la direction du vent.

Comme pour l'hémisphère, l'incidence 90° correspond au cas où le vent attaque la surface du côté concave, l'incidence — 90° à celui où il rencontre d'abord le côté convexe, les filets d'air étant dans les deux cas parallèles à la normale au plan diamétral, et les incidences sont comptées par rapport à ce dernier.

Résultats des mesures. — Comme on pouvait s'y attendre, la variation de la résistance de l'hémicylindre en fonction de l'incidence est tout à fait différente suivant que l'on opère de la première ou de la seconde manière. Il suffit, pour s'en faire une idée, de comparer les nombres correspondant à une même valeur

de l'incidence dans les deux Tableaux ci-après qui contiennent les mêmes données que dans le cas de l'hémisphère et sont distribués comme ceux que nous avons donnés au Chapitre précédent, les mêmes signes correspondant aux mêmes quantités.

Pour la commodité du langage, nous avons affecté de l'indice 1 les incidences et les résultats correspondant au premier cas et de l'indice 2 ceux qui correspondent au second.

Résistance totale. — La résistance totale présente dans le premier cas des variations qui ont les plus grandes analogies avec celles qui ont été trouvées pour l'hémisphère. Son minimum absolu se rencontre pour une valeur de l'incidence très voisine de 0° et elle présente deux maxima inégaux dont le plus élevé se trouve vers 50° et le plus faible vers -40° .

Dans le second cas, le minimum qui est placé à 0° est très accusé, le maximum absolu correspond à l'angle 90° , un maximum secondaire se produit pour l'incidence -60° .

Le coefficient de résistance unitaire, exprimé en kilogrammes par mètre carré, est plus fort pour l'hémicylindre que pour l'hémisphère. On trouve en effet comme valeur de ce coefficient K :

	Hémisphère.	Hémicylindre.
$K_{90^{\circ}}$	0,092	0,096
$K_{-90^{\circ}}$	0,024	0,039
$\frac{K_{90^{\circ}}}{K_{-90^{\circ}}}$	3,83	2,46

Le rapport $\frac{K_{90^{\circ}}}{K_{-90^{\circ}}}$ est 1,55 fois plus grand pour l'hémisphère que pour l'hémicylindre; c'est à 8 pour 100 près le rapport (1,46) qui existe entre les vitesses de rotation des moulinets M (Robinson) et N (moulinet à hémicylindres perpendiculaires aux bras), dans un courant d'air de 20 m : sec.

VARIATION DE LA RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE
DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec. $t = 15^{\circ}$, $H = 760^{\text{mm}}$.

I. — Cas où l'on fait tourner l'hémicylindre autour de son axe placé horizontalement et perpendiculairement aux filets d'air.

ι .	p .	T.	R.	α .
0	0	678	678	0
90	214	639	673	19
80	342	628	715	29
70	434	628	763	35
60	485	625	791	38
50	473	604	767	38
40	419	535	679	38

VARIATION DE LA RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE
DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec. $t = 15^\circ$, $H = 760^{\text{mm}}$.

I. — *Cas où l'on fait tourner l'hémicylindre autour de son axe placé horizontalement et perpendiculairement aux filets d'air.*

$i.$	$p.$	$T.$	$R.$	$\alpha.$
0	322^g	401^g	514^g	39^0
20	113	268	294	23
40	— 42	223	227	— 11
60	— 59	223	230	— 15
80	— 74	220	232	— 19
100	— 80	217	231	— 20
120	— 77	214	227	— 20
140	— 30	259	260	— 7
160	178	300	349	31
180	193	309	364	32
200	175	280	330	32
220	140	271	305	27
240	92	250	266	20
260	45	256	260	10
280	0	275	275	0

II. — *Cas où l'on fait tourner l'hémicylindre autour d'une droite horizontale, normale à son axe, contenue dans le plan diamétral et perpendiculaire aux filets d'air.*

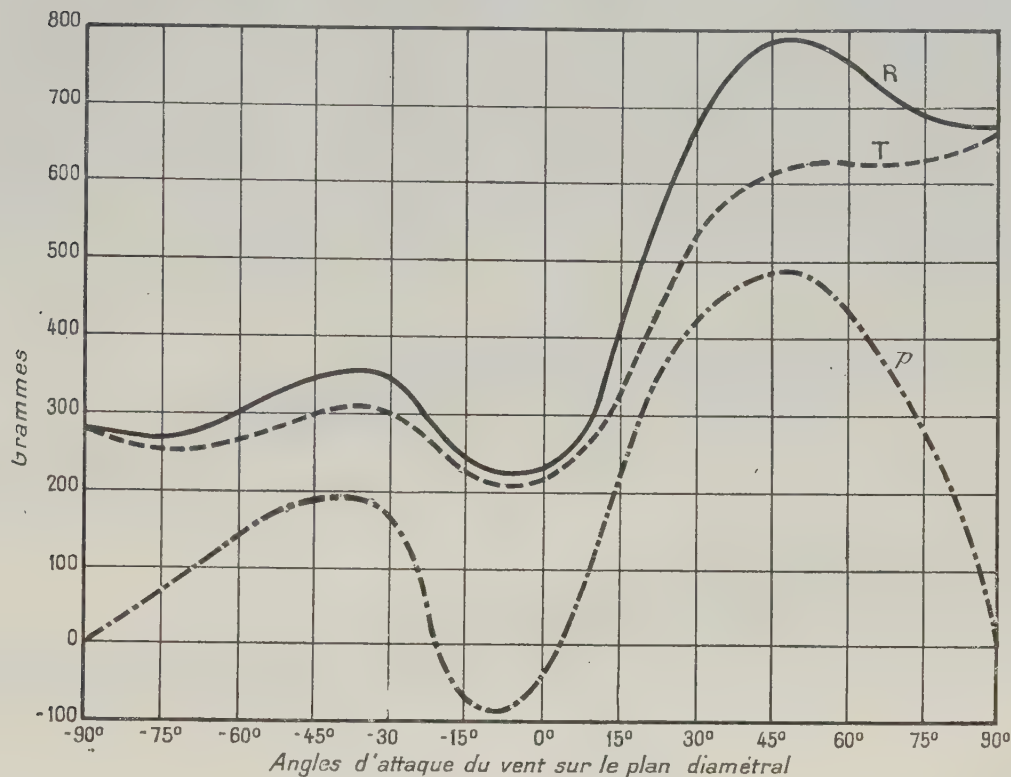
$i.$	$p.$	$T.$	$R.$	$\alpha.$
0	0^g	675^g	675^g	0^0
90	113	645	655	10
80	202	598	631	19
70	280	532	601	28
60	345	443	561	38
50	387	342	516	49
40	369	235	437	58
30	291	137	322	65
20	167	68	181	68
10	0	42	42	0
0	— 149	62	161	— 67
10	— 250	110	273	— 66
20	— 247	161	295	— 57
30	— 226	211	309	— 47
40	— 196	250	318	— 38
50	— 164	277	322	— 31
60	— 122	291	315	— 23
70	— 65	297	304	— 12
80	0	280	280	0

Poussée. — Les variations de la poussée offrent des anomalies dignes de remarque. Dans le cas I, la poussée reste positive sous toutes les incidences, sauf entre 20° et 210° , et suit une courbe analogue à celle que nous avons trouvée pour l'hémisphère. Dans le cas II, elle change de signe pour l'incidence 0° , reste positive pour tous les angles d'attaque supérieurs à cette

valeur et négative pour tous ceux qui lui sont inférieurs. Elle s'annule également pour les incidences 90° et -90° en passant par un maximum pour un

RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE DANS UN COURANT D'AIR
DE 20 m : sec A 15° ET 760^{mm}.

Fig. 34.



Cas I. — Poussée (p), trainée (T) et résistance totale (R).

angle voisin de 40° et par un minimum (maximum de poussée dirigée vers le bas) vers -25° .

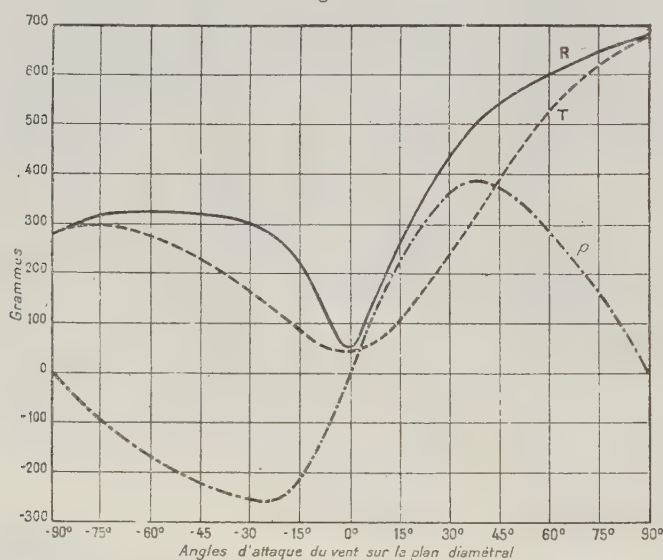
Trainée. — Là encore une différence très nette se manifeste entre les deux cas que nous avons considérés. Dans le premier, nous retrouvons toujours la même analogie avec ce qui se passe quand on expérimente sur l'hémisphère : minimum pour une faible valeur négative de l'inclinaison, maximum sous l'incidence 90° , maximum secondaire pour un angle d'attaque négatif qui dans le cas présent est sensiblement égal à -37° . Dans le second, la variation est plus simple : le maximum absolu correspond à 90° , le minimum absolu à 0° . On note que, entre 3° et 44° , T_2 est inférieur à p_2 , tandis que T_1 est toujours supérieur à p_1 quelle que soit l'incidence.

Vérification directe de l'existence d'une poussée dirigée vers le haut pour de

fortes incidences négatives dans le cas de l'hémisphère et de l'hémicylindre (cas I).
 — Quoique les résultats de nos recherches sur la résistance de l'hémicylindre confirment pleinement ceux que nous avons obtenus en étudiant l'hémisphère, il nous a paru utile de vérifier par l'expérience directe l'existence de la poussée vers le haut révélée par les mesures à la balance et que subissent ces surfaces lorsque l'incidence devient inférieure à -6° pour l'hémisphère et à -25° pour l'hémicylindre.

RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE
 DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : SEC A 15° ET 760^{mm}.

Fig. 3).



Cas II. — Poussée (p), trainée (T) et résistance totale (R).

Dans ce but, j'ai fait construire l'appareil suivant : Aux extrémités d'une plaque métallique horizontale de 3^{cm} de largeur, fixée par trois vis sur un support rigide, sont montées deux glissières verticales de 28^{cm} de hauteur et distantes de 25^{cm}. Une tige filetée, terminée à ses deux bouts par des traverses munies de roulettes qui viennent se loger dans les glissières, supporte la surface à essayer. Celle-ci peut prendre autour de la tige toutes les inclinaisons que l'on désire; on la fixe à l'aide de quatre écrous. Son bord antérieur vient s'appuyer sur un support mobile reposant sur un ressort à boudin enfermé dans un tube de cuivre et destiné à équilibrer l'action de la pesanteur. Par mesure de précaution, lors de l'installation de l'appareil dans la chambre d'expériences du laboratoire G. Eiffel, les glissières, au lieu d'être placées verticalement, ont été légèrement inclinées du côté d'où soufflait le vent de manière à éviter que les déplacements constatés de bas en haut pussent être attribués à l'action de la trainée.

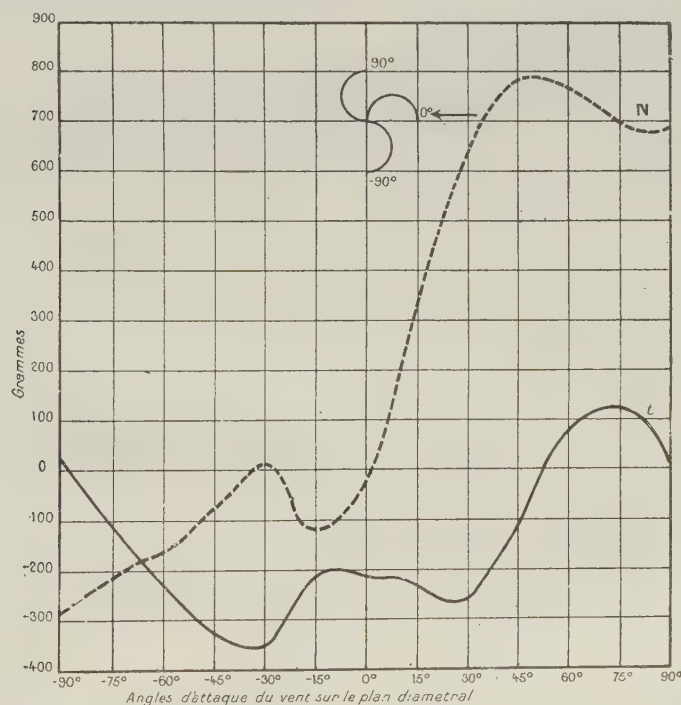
Lorsqu'on met en marche la soufflerie, l'hémicylindre étant placé sous l'incidence -30° (cas I), on voit celui-ci se soulever progressivement à partir du moment où la vitesse du courant d'air atteint une valeur comprise entre 15 et 20 m : sec. Quand on arrive aux environs de 30 m : sec, on peut supprimer le support actionné par le ressort à boudin, la poussée que subit la surface essayée est alors suffisante pour équilibrer le poids du système mobile (366g) augmenté de la composante de la traînée dirigée vers le bas et résultant de l'inclinaison donnée aux glissières.

Des expériences analogues faites avec l'hémisphère ont donné des résultats comparables, et les essais que nous avons réalisés sous des incidences allant jusqu'à -70° ont pleinement confirmé les conclusions découlant des mesures à la balance.

Composante normale au plan diamétral. — Comme nous l'avons fait pour l'hémisphère, nous donnons ci-après les valeurs de la composante normale et

RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec A 15° ET 760^{mm} .

Fig. 36.



Cas I. — Composante normale (N) et tangentielle (t) au plan diamétral.

de la composante tangentielle au plan diamétral, ainsi que celles de l'angle θ formé par la résistance totale avec la normale à ce plan en adoptant les mêmes conventions.

RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec.

$$t = 15^{\circ}, \quad H = 760^{\text{mm}}.$$

Variations de la composante normale et de la composante tangentielle au plan diamétral en fonction de l'incidence.

I.				II.			
$i.$	N.	$t.$	$\theta.$	$i.$	N.	$t.$	$\theta.$
0°	678^g	0^g	0°	90°	675^g	0^g	0°
90°	665	105	9	80°	655	0	0
80°	706	112	9	70°	631	-11	-1
70°	760	66	5	60°	600	-21	-2
60°	790	-28	-2	50°	560	-20	-2
50°	750	-160	-12	40°	516	-9	-1
40°	629	-255	-22	30°	437	-15	-2
30°	440	-265	-31	20°	321	-28	-5
20°	201	-215	-47	10°	177	-38	-12
10°	-43	-223	-101	0°	0	-42	-90
0°	-67	-220	-107				
-20°	-91	-214	-113				
-30°	-101	-208	-116				
-40°	-114	-197	-120	-10°	-157	-36	-167
-50°	-118	-232	-117	-20°	-272	-19	-176
-60°	6	-349	-89	-30°	-295	-15	-177
-70°	-51	-360	-98	-40°	-309	-16	-177
-80°	-102	-314	-108	-50°	-318	-11	-178
-90°	-166	-256	-123	-60°	-322	+5	+179
	-204	-171	-140	-70°	-315	+16	+177
	-244	-89	-160	-80°	-304	+11	+178
	-275	0	-180	-90°	-280	0	-180

Dans le cas I, la composante normale présente un maximum absolu pour une incidence très rapprochée de 50° ; elle décroît ensuite très rapidement, s'annule pour l'incidence 20° , devient ensuite négative et passe par un minimum relatif quand l'angle d'attaque atteint la valeur -20° . Elle croît ensuite, prend une faible valeur positive sous l'incidence -30° où elle passe par un maximum relatif, redevient ensuite négative et décroît jusqu'au moment où l'inclinaison est -90° .

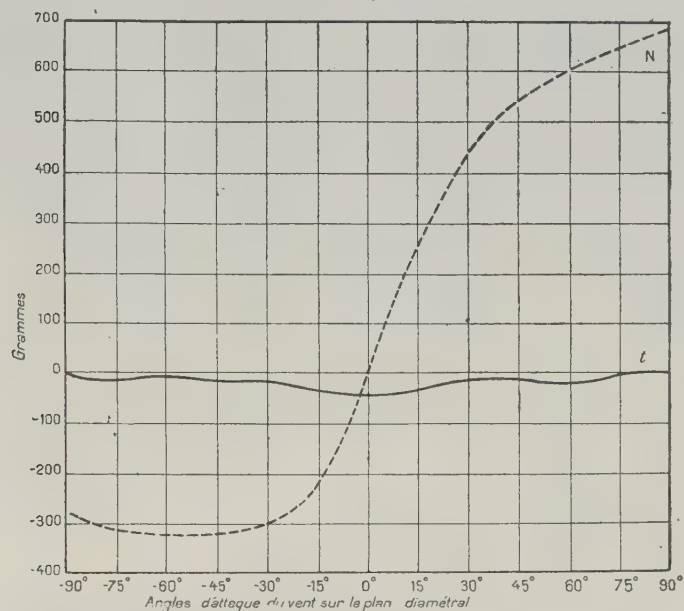
Dans le cas II, le maximum secondaire disparaît, le maximum absolu se produit pour l'incidence 90° , le minimum absolu vers -60° . La courbe affecte une forme tout à fait régulière et recoupe l'axe des incidences pour $i = 0^{\circ}$.

Composante tangentielle et angle de la résultante avec la normale au plan diamétral. — t , est positive et R , fait, suivant les conventions adoptées, un angle positif avec la normale au plan diamétral pour les incidences comprises entre 90° et 53° . Sous ces deux angles d'attaque, ainsi que sous l'angle -90° , elle s'annule et la résultante est dirigée perpendiculairement au plan diamétral.

Quand l'inclinaison reste comprise entre -90° et 53° , la composante tangentielle reste toujours négative. Elle présente deux maxima et deux minima que l'on

RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX EN FONCTION DE L'INCIDENCE
DANS UN COURANT D'AIR DE 20 m : sec A 15° ET 760^{mm}.

Fig. 37.



Cas II. — Composante normale (N) et tangentielle (t) au plan diamétral (1).

rencontre respectivement pour les incidences suivantes : 70° à 75° (maximum absolu), 20° à 25° (minimum relatif), -10° à -11° (maximum relatif), -35° à -40° (minimum absolu).

La variation est beaucoup moins nette dans le cas II. La composante tangentielle reste toujours très faible et ne prend des valeurs positives qu'entre -55° et 90° . Son minimum absolu correspond à l'incidence 0° . La résultante ne s'écarte notablement de la normale au plan diamétral que pour les incidences comprises entre 20° et -20° .

Variation du coefficient de résistance avec la vitesse du vent. — J'ai déterminé, comme dans le cas de l'hémisphère, les variations du coefficient de résistance de l'hémicylindre en fonction de la vitesse du courant d'air pour un certain nombre d'incidences. Le Tableau où sont consignés les résultats des mesures est disposé comme celui où ont été donnés ceux que j'ai obtenus en étudiant l'hémisphère. Les incidences affectées de l'indice 1 ont trait au cas où l'hémi-

(1) Par suite d'une erreur de dessin, les valeurs positives de la composante tangentielle correspondant aux inclinaisons -60° , -70° , -80° ont été portées au-dessous de l'axe des abscisses. On rétablira facilement la courbe à l'aide des données contenues dans le Tableau de la page 136 (cas II).

cylindre est disposé de manière que son axe soit horizontal et perpendiculaire au vent.

VARIATIONS DU COEFFICIENT DE RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX SOUS DIVERSES INCIDENCES
EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT.

$$t = 15^{\circ}, \quad H = 760^{\text{mm}}.$$

V.	$\frac{p}{V^2}$	$\frac{T}{V^2}$	$\frac{R}{V^2}$	α	$\frac{N}{V^2}$	$\frac{t}{V^2}$	θ
$i = 90^{\circ}$							
5 ^m	0	1,99	1,99	0	1,99	0	0
10	0	1,76	1,76	0	1,76	0	0
15	0	1,72	1,72	0	1,72	0	0
20	0	1,70	1,70	0	1,70	0	0
25	0	1,69	1,69	0	1,69	0	0
30	0	1,67	1,67	0	1,67	0	0
35	0	1,66	1,66	0	1,66	0	0

$$i = 45^{\circ}_1.$$

5	1,09	1,47	1,83	36	1,81	-0,29	- 9
10	1,19	1,44	1,87	40	1,86	-0,16	- 5
15	1,20	1,43	1,86	40	1,86	-0,16	- 5
20	1,20	1,43	1,86	40	1,86	-0,16	- 5
25	1,20	1,43	1,86	40	1,86	-0,16	- 5
30	1,20	1,43	1,86	40	1,86	-0,16	- 5
35	1,20	1,43	1,86	40	1,86	-0,16	- 5

$$i = 45^{\circ}_2.$$

5	1,07	0,98	1,45	47	1,45	0,05	+ 2
10	0,99	0,98	1,39	45	1,39	0,00	0
15	0,92	0,98	1,34	43	1,34	-0,05	- 2
20	0,92	0,98	1,34	43	1,34	-0,05	- 2
25	0,92	0,98	1,34	43	1,34	-0,05	- 2
30	0,92	0,98	1,34	43	1,34	-0,05	- 2
35	0,92	0,98	1,34	43	1,34	-0,05	- 2

$$i = 0^{\circ}_1.$$

5	»	»	»	»	»	»	»
10	-0,10	0,57	0,57	-10	-0,10	-0,57	-100
15	-0,10	0,54	0,55	-11	-0,11	-0,54	-101
20	-0,10	0,56	0,57	-11	-0,11	-0,56	-101
25	-0,10	0,59	0,60	-10	-0,10	-0,59	-100
30	-0,10	0,60	0,61	- 9	-0,10	-0,60	- 99
35	-0,10	0,61	0,62	- 9	-0,10	-0,61	- 99

$$i = -45^{\circ}_1.$$

5	0,47	0,86	0,97	29	-0,27	-0,94	-106
10	0,47	0,75	0,89	32	-0,20	-0,86	-103
15	0,47	0,74	0,87	32	-0,20	-0,85	-103
20	0,47	0,74	0,87	32	-0,20	-0,85	-103
25	0,47	0,74	0,87	32	-0,20	-0,85	-103
30	0,47	0,74	0,87	32	-0,20	-0,85	-103
35	0,47	0,74	0,87	32	-0,20	-0,85	-103

VARIATIONS DU COEFFICIENT DE RÉSISTANCE D'UN HÉMICYLINDRE CREUX SOUS DIVERSES INCIDENCES
EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT (*suite*).

$$i = 15^{\circ}, \quad H = 760^{\text{mm}}.$$

V.	$\frac{p}{V^2}$	$\frac{T}{V^2}$	$\frac{R}{V^2}$	α	$\frac{N}{V^2}$	$\frac{t}{V^2}$	θ
$i = -45^{\circ}_2$							
5 ^m	-0,53	0,48	0,71	-48 ⁰	-0,71	+0,04	+177 ⁰
10	-0,53	0,57	0,77	-43	-0,77	-0,03	-178
15	-0,53	0,58	0,78	-43	-0,78	-0,04	-177
20	-0,53	0,58	0,78	-43	-0,78	-0,04	-177
25	-0,53	0,58	0,78	-43	-0,78	-0,04	-177
30	-0,53	0,58	0,78	-43	-0,78	-0,04	-177
35	-0,53	0,58	0,78	-43	-0,78	-0,04	-177

$$i = -90^{\circ}.$$

5	0	0,91	0,91	0	-0,91	0	± 180
10	0	0,79	0,79	0	-0,79	0	180
15	0	0,74	0,74	0	-0,74	0	180
20	0	0,71	0,71	0	-0,71	0	180
25	0	0,69	0,69	0	-0,69	0	180
30	0	0,68	0,68	0	-0,68	0	180
35	0	0,68	0,68	0	-0,68	0	180

Comme pour l'hémisphère, le coefficient de résistance tend en général à diminuer quand la vitesse du vent augmente, sauf sous l'incidence -45°_2 et sous l'incidence 0° où il tend à augmenter.

Les variations de ce coefficient paraissent dues principalement à des modifications de la traînée et sont surtout sensibles aux faibles vitesses du vent.

En se basant sur les résultats qui viennent d'être exposés, on peut calculer approximativement le rapport existant, sous l'inclinaison 0° , entre les vitesses de rotation de deux moulinets à axe perpendiculaire comportant, l'un des ailettes hémisphériques, l'autre des ailettes hémicylindriques disposées perpendiculairement aux bras, lorsqu'on les place côte à côte dans le même courant d'air.

On trouve ainsi que les vitesses de rotation observées doivent être dans le rapport de 0,47 (moulinet à coupes hémisphériques) à 0,31 (moulinet à hémicylindres perpendiculaires aux bras). C'est à peu près les nombres que l'on retrouve d'après nos mesures. Les vitesses de rotation observées à 20 m : sec pour les moulinets M et N sont, en tenant compte de leurs diamètres respectifs, dans le rapport de 0,43 à 0,31.

La valeur du rapport $\frac{v}{V}$ calculée pour un moulinet à palettes hémicylindriques radiales est 0,13. L'expérience donne pour le moulinet P à 20 m : sec 0,20.

L'accord peut être regardé comme satisfaisant si l'on considère que pour faire le calcul nous avons dû admettre que les divers points des ailettes avaient la même vitesse relative, alors qu'en réalité, dans le moulinet P, la vitesse linéaire du bord externe des palettes est 1,86 fois plus grande que celle du bord interne.

La connaissance de la résistance des ailettes sous les diverses incidences permet donc, non seulement de prévoir dans quel sens se modifie la vitesse de rotation d'un moulinet à axe perpendiculaire suivant la forme qu'affectent les organes moteurs, mais de déterminer approximativement l'ordre de grandeur de la variation qui s'introduit dans sa vitesse de rotation quand on vient à changer la forme de ses ailettes. Il s'ensuit que si l'on pouvait déterminer la quantité $\frac{N}{V^2}$ pour toutes les incidences et toutes les vitesses, il serait possible de démontrer par le calcul que, comme l'expérience nous l'a fait voir, aucune loi simple ne peut présider aux changements que subit la vitesse angulaire des moulinets à hémicylindres à mesure que varie l'inclinaison des filets d'air sur leur plan de rotation; on s'apercevrait de plus que c'est bien dans les modifications du coefficient de résistance, tant en fonction de l'incidence qu'en fonction de la vitesse du vent, qu'il faut chercher l'explication des phénomènes observés.

Il ne faudrait cependant pas se leurrer sur la portée pratique des conclusions que l'on est en droit de tirer, au point de vue anémométrique, de mesures de résistance faites dans les conditions où l'on se trouve placé dans les laboratoires aérodynamiques, c'est-à-dire dans des courants d'air formés de filets parallèles et animés de la même vitesse. Cette condition ne correspond, en effet, que très imparfaitement à celles qui sont réalisées quand le moulinet est en rotation: à ce moment, les vitesses de l'air par rapport à l'ailette varient d'un point à l'autre de celle-ci et il en est de même de l'angle d'attaque. De plus, par le fait même de la rotation, il s'introduit dans le courant des perturbations dont les effets, actuellement inconnus, ne sont peut-être pas toujours négligeables. Enfin, s'il semble hors de doute que les variations du facteur anémométrique des moulinets à axe perpendiculaire sont en relation directe avec les changements de la résistance de leurs ailettes suivant la forme de celle-ci, l'angle d'attaque, et la vitesse du vent, il est bon de rappeler que ces variations ont leur répercussion sur les frottements axiaux, répercussion qui vient ajouter son action à celle des remous créés par la rotation pour augmenter la complexité de la loi reliant la vitesse angulaire des moulinets à la vitesse et à l'inclinaison du vent.

CHAPITRE IV.

CONCLUSION.

La méthode employée dans ces recherches se montrée beaucoup plus souple que la méthode du manège pour étudier le fonctionnement des moulinets anémométriques dans des courants d'air permanents. Elle élimine les incertitudes provenant de l'entraînement de l'air par le bras du manège et de la réduction du mouvement circulaire au mouvement rectiligne. Elle permet en outre, dans des conditions particulièrement commodes, l'étude systématique de l'influence de l'inclinaison du vent sur la vitesse de rotation de ces moulinets, influence sur laquelle on ne possédait jusqu'à présent que des données très incomplètes.

Par son moyen, j'ai pu, tout en confirmant un certain nombre des résultats fournis par les essais au manège, ajouter des données nouvelles aux connaissances que nous possédions sur les anémomètres à rotation. Quelques-unes d'entre elles ne sont pas dénuées d'importance au point de vue pratique et sont susceptibles de fournir d'utiles indications en ce qui concerne la construction de ces instruments. Les autres forment le point de départ de l'étude rationnelle des anémomètres dans le vent naturel, sans laquelle il est impossible d'interpréter d'une manière précise les mesures de la vitesse de cet élément réalisées par leur intermédiaire.

Nous allons rappeler brièvement les plus importantes :

1° Dans les limites où ont été faites la majeure partie des expériences rapportées ci-dessus, soit entre 5 et 30 m : sec, l'étude des variations du facteur anémométrique $\alpha = \frac{V}{n}$, sous l'incidence de fonctionnement normal, a montré que la loi permettant de déduire la vitesse d'un courant d'air permanent de la vitesse de rotation des moulinets pouvait, suivant les cas, se représenter pratiquement par l'une des trois formules suivantes :

- | | |
|-------|----------------------|
| (I) | $V = \alpha n,$ |
| (II) | $V = a + bn,$ |
| (III) | $V = a + bn + cn^2.$ |

Dans le cas des moulinets à axe parallèle, l'expérience nous a fait voir qu'il est possible de réaliser, sans adjoindre à ces derniers aucun mécanisme de correc-

tion plus ou moins compliqué, des anémomètres obéissant à la première de ces relations dans des limites assez larges et avec une approximation suffisante pour répondre aux besoins de l'anémométrie pratique.

Les variations que subit x , quand on augmente progressivement la vitesse du courant d'air jusqu'à 40 m : sec, m'ont conduit à rechercher, dans les actions déformatrices exercées par la force centrifuge sur les ailettes, l'explication des phénomènes observés. Le calcul et l'expérience ont montré que ces actions sont loin d'être négligeables et m'ont permis d'établir les principes sur lesquels on devait se guider pour diminuer leur importance.

Comme, dans aucun cas, l'équation (I) ne paraît être applicable aux moulinets à axe perpendiculaire, et que la formule anémométrique qui convient à la plupart de ceux-ci comporte un terme en n^2 , je me suis attaché à vérifier sur des moulinets très différents de ceux sur lesquels avait autrefois expérimenté Dohrandt, l'exactitude du résultat obtenu par cet auteur. D'après lui, il est possible, en modifiant judicieusement le rapport du diamètre des coupes à celui du moulinet, de réaliser des instruments dans lesquels le coefficient du terme en n^2 est rigoureusement nul. En comparant mes résultats à ceux de Dohrandt, j'ai pu montrer que cette condition est pratiquement réalisée par les moulinets pour lesquels ce rapport $\frac{d}{D}$ s'écarte peu de la valeur 0,5 sous la réserve que les coupes présentent une résistance suffisante aux déformations causées par la force centrifuge dont l'action, aux vitesses élevées du courant d'air, est surtout à craindre avec des coupes construites en métal flexible et peu épais.

La substitution, aux coupes hémisphériques, d'ailettes hémicylindriques disposées perpendiculairement au plan de rotation du moulinet, n'améliore pas le fonctionnement de ce dernier. Elle a pour effet, tout en diminuant la vitesse de rotation, d'augmenter l'importance relative du coefficient du terme en n^2 dans la formule anémométrique. Mais si les hémicylindres sont placés radialement, leur axe étant parallèle au bras qui les porte, le terme en n^2 , toutes choses égales d'ailleurs, est fortement réduit; il s'est montré pratiquement nul dans le moulinet de ce genre que nous avons essayé.

2° En déterminant l'influence de l'inclinaison du courant d'air sur la vitesse de rotation des moulinets, j'ai montré que l'on ne peut pas admettre que les anémomètres à rotation actuels donnent la vraie valeur de la composante horizontale de la vitesse du vent quand l'inclinaison de ce dernier sur l'horizon dépasse 10° à 15°.

J'ai mis en évidence que la loi qui régit les variations de la vitesse de rotation en fonction de l'incidence n'est pas la même pour les anémomètres à axe parallèle et à axe perpendiculaire et que la forme de leurs ailettes aussi

bien que les dimensions relatives de leurs divers organes intervient pour la modifier. J'ai démontré d'autre part que la variation de la vitesse de rotation des moulinets en fonction de la vitesse du vent change avec l'inclinaison de celui-ci sur l'horizon suivant une loi qui diffère d'un système de moulinet à l'autre. Ce résultat met nettement en lumière les incertitudes que comporte le procédé de tarage recommandé d'abord par Dohrandt et conseillé ensuite par Neumayer, procédé qui consiste à comparer dans le vent naturel les indications des anémomètres à étalonner à celles d'un instrument de dimensions réduites préalablement étudié au manège.

3° Un fait curieux et qui paraît être général ressort de ces recherches : pour tous les moulinets étudiés, la vitesse de rotation s'annule quand le courant d'air les attaque sous une incidence s'écartant de 70° à 85° de celle qui correspond au fonctionnement normal.

Dans le cas des moulinets à ailettes hémisphériques, ou hémicylindriques disposées radialement, l'expérience m'a montré qu'il existe toute une série d'inclinaisons pour lesquelles la rotation a lieu dans le sens inverse du sens ordinaire. L'*inclinaison d'arrêt* ou *incidence critique* forme la limite entre les incidences correspondant aux rotations inverses et celles qui se rapportent aux rotations directes. J'ai fait voir que l'inclinaison d'arrêt dépend de la vitesse du vent et des dimensions du moulinet.

Les moulinets à axe parallèle, au contraire, restent immobiles dès que l'on a atteint l'incidence critique, tant que l'angle formé par la direction du courant avec leur plan reste compris entre 0° et la valeur de cette dernière.

En introduisant ces données nouvelles dans la discussion des procédés de mesure de la composante verticale de la vitesse du vent basés sur l'emploi des moulinets anémométriques, j'ai pu donner l'explication des résultats paradoxaux qu'avait fournis leur emploi.

4° J'ai enfin étudié la résistance d'un hémisphère et d'un hémicylindre creux sous diverses incidences et dans des courants d'air de vitesses différentes. Par suite des circonstances spéciales dans lesquelles j'ai dû poursuivre mon travail il ne m'a pas été donné de pousser aussi loin que je l'aurais voulu les recherches entreprises en vue de relier les phénomènes causés par les changements d'inclinaison du vent aux variations des efforts exercés par ce dernier sur les ailettes des moulinets. J'ai pu cependant, en déterminant la variation du coefficient de résistance des ailettes hémisphérique et hémicylindrique soumises aux essais, apporter quelques données entièrement nouvelles sur la résistance de ces surfaces et jalonner la voie par laquelle on peut légitimement espérer parvenir à expliquer quantitativement les faits révélés par l'expérimentation.

Telle qu'elle est, cette étude, par les faits nouveaux qu'elle apporte, me paraît un pas de plus vers la solution définitive du problème difficile qu'est la mesure de la vitesse du vent. Quoiqu'elle soit destinée spécialement aux météorologistes, j'espère qu'elle pourra être utile à tous ceux qui s'occupent de la détermination précise de cet élément et que les résultats qu'elle contient, en particulier ceux qui ont trait à la résistance des surfaces hémisphériques et hémicylindriques, ne seront pas sans intérêt pour les aérodynamistes.

Vu et approuvé :

Paris, le 1^{er} octobre 1920.

P. LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES :

L'Assesseur,

G. LIPPMANN.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 1^{er} octobre 1920.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

P. APPELL.



TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
PRÉFACE.....	1
INTRODUCTION. — Considérations générales sur le vent et sa mesure.....	3

PREMIÈRE PARTIE.

HISTORIQUE DE L'ANÉMOMÉTRIE.

CHAPITRE I. — Les divers types d'anémomètres et leur historique.....	11
CHAPITRE II. — Recherches antérieures sur les anémomètres employés en Météorologie.....	24

DEUXIÈME PARTIE.

RECHERCHES PERSONNELLES SUR LES MOULINETS ANÉMOMÉTRIQUES.

CHAPITRE I. — Méthodes de mesure.....	34
CHAPITRE II. — Principe du fonctionnement et description des moulinets étudiés.....	48
CHAPITRE III. — Variations du facteur anémométrique sous l'incidence de fonctionnement normal.....	61
CHAPITRE IV. — Variations du facteur anémométrique en fonction de l'inclinaison du vent par rapport au plan du moulinet.....	81
CHAPITRE V. — Sur la mesure de l'inclinaison du vent à l'aide des moulinets anémométriques..	108

TROISIÈME PARTIE.

INFLUENCE DE L'INCLINAISON DU VENT SUR LA RÉSISTANCE DES AILETTES HÉMISPHÉRIQUES ET HÉMICYLINDRIQUES.

CHAPITRE I. — Essai d'interprétation des variations du facteur anémométrique en fonction de l'inclinaison du vent.....	111
CHAPITRE II. — Étude de la résistance d'un hémisphère creux en fonction de l'inclinaison du vent sur son plan diamétral.....	120
CHAPITRE III. — Étude de la résistance d'un hémicylindre creux en fonction de l'inclinaison du vent sur son plan diamétral.....	131
CHAPITRE IV. — Conclusion.....	141



SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Chimie : Études chimiques de l'eau de pluie.

Vu et approuvé :

Paris, le 1^{er} octobre 1920.

P. LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES :

L'Assesseur,

G. LIPPMANN.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 1^{er} octobre 1920.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

P. APPELL.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie},
64340 Quai des Grands-Augustins, 55.
